

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

**Vliv technologických parametrů na povrchová napětí při
obrábění na simulátoru přerušovaného řezu**

**Technological Parameters Influence to Residual Stresses
at Interrupted Cut Simulator**

Student:

Bc. Šárka Malotová

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Robert Čep, Ph. D.

Ostrava 2015

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra obrábění a montáže

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Šárka Malotová**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie
Specializace: 20 Strojírenská technologie
Téma: **Vliv technologických parametrů na povrchová napětí při obrábění na
simulátoru přerušovaného řezu**
**Technological Parameters Influence to Residual Stresses at Interrupted
Cut Simulator**

Zásady pro vypracování:

1. Úvod do problematiky.
2. Přehled zkoušek přerušovaným řezem.
3. Metody měření povrchových napětí.
4. Návrh experimentální části.
5. Zhodnocení a závěry.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] BRYCHTA, J.; ČEP, R.; NOVÁKOVÁ, J.; PETŘKOVSKÁ, L. *Technologie II 1. díl*. Ostrava : Ediční středisko VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2007, s. 126. ISBN 978-80-248-1641-8.
[2] BRYCHTA, J.; ČEP, R.; NOVÁKOVÁ, J.; PETŘKOVSKÁ, L. *Technologie II 2. díl*. Ostrava : Ediční středisko VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2008, s. 150. ISBN 978-80-248-1822-1.
[3] NESLUŠAN, M.; TUREK, S.; BRYCHTA, J.; ČEP, R.; TABAČEK, M. *Experimentální metody v trieskovém obrábění*. 1. vyd. Žilina : Žilinská univerzita v Žiline, EDIS, 2007. 343 s. ISBN 978-80-8070-711-8.
[4] SHAW, Milton C. *Metal Cutting Principles*. 2nd edition. New York : Oxford University Press, 2005. 651. p. ISBN 0-19-514206-3.


Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Robert Čep, Ph.D.**


Konzultant diplomové práce: Ing. Adam Janásek

Datum zadání: 12.12.2014

Datum odevzdání: 18.05.2015


Ing. et Ing. Mgr. Jana Petrů, Ph.D.
vedoucí katedry

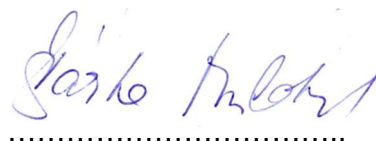



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracovala samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedla jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 18. 5. 2015



.....
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byla seznámena s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́доміі, же Высoкá škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít § 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́доміі, же odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 18. 5. 2015

.....
podpis studenta

Jméno a příjmení autora práce: Bc. Šárka Malotová

Adresa trvalého pobytu autora práce: Ve Žlebech 133, 763 14 Zlín - Štípa

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

MALOTOVÁ, Š. *Vliv technologických parametrů na povrchová napětí při obrábění na simulátoru přerušovaného řezu*: Diplomová práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2015, 70 s. Vedoucí práce: ČEP, R.

Diplomová práce se zabývá vyhodnocením zbytkového napětí ve dvou druzích materiálů, které byly obrobena za různých řezných podmínek s využitím simulátoru přerušovače řezu. V teoretické části práce jsou popsány druhy zkoušek přerušovaného řezu, následně charakteristika zbytkového napětí včetně experimentálních metod na jejich zjištění. Experimentální část je zaměřena na přípravu lišt před samotným měřením pomocí simulátoru přerušovače řezu. Na základě rentgenové difrakce budou stanovena a vyhodnocena zbytková napětí v materiálech.

Klíčová slova: Přerušovaný řez, Zbytková napětí, Rentgenová difrakce.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

MALOTOVÁ, Š. *Technological Parameters Influence to Residual Stresses at Interrupted Cut Simulator*: Master Thesis. Ostrava VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining, Assembly and Mechanical Metrology, 2015, 70 p. Thesis head: ČEP, R.

The thesis deals with the evaluation of residual stress in two kinds of materials, which were machined under different cutting conditions with using simulator of interrupted cut. The theoretical part describes the types of tests interrupted cut and characteristics of residual stress including their methods. The experimental part is focused on the preparation materials before measuring with using simulator interrupted cut. On basis of X – ray diffraction to be determined and evaluated residual stress in the materials.

Key words: Interrupted cut, Residual stress, X – ray diffraction.

OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLŮ	8
ÚVOD	9
1 PŘEHLED ZKOUŠEK PŘERUŠOVANÝM ŘEZEM	10
1.1 Podélné soustružení s válcem se vsazenými lopatkami.....	10
1.2 Podélné soustružení s podélnými drážkami.....	11
1.3 Čelní soustružení s válcovými čepy	12
1.4 Zkouška čelního frézování	13
1.5 Zkouška vodorovného obrážení.....	13
2 POVRCHOVÁ NAPĚTÍ.....	15
2.1 Základní mechanismy vzniku zbytkového napětí	16
2.2 Důsledky zbytkové napjatosti.....	18
2.3 Povlakování nástrojových materiálů.....	18
2.4 Zbytková napětí během svařování	18
2.5 Klasifikace zbytkových napětí	19
2.6 Experimentální metody pro měření zbytkových pnutí.....	20
2.6.1 Mechanické metody.....	22
2.6.2 Fyzikální metody	25
3 NÁVRH EXPERIMENTU	28
3.1 Sestavení přípravku.....	29
3.2 Obráběcí stroj.....	30
3.3 Použitý nástroj.....	30
3.4 Použitý držák.....	31
3.5 Materiál obráběných lišt.....	31
3.6 Postup experimentu.....	33
3.6.1 Plán experimentu.....	34
3.7 Měření zbytkových napětí.....	35
3.7.1 Měřicí zařízení Proto iXRD	35
3.7.2 Postup měření	35
3.8 Výsledky měření a vyhodnocení zbytkových napětí.....	38

3.8.1	Materiál ISO C45 (ČSN 12 050)	38
3.8.2	Materiál ISO 11CrMo9-10 (ČSN 15 128)	46
3.9	Výsledky měření a vyhodnocení drsnosti obrobeného povrchu	53
4	ZHODNOCENÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ	57
	PODĚKOVÁNÍ	62
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	63
	SEZNAM OBRÁZKŮ	66
	SEZNAM TABULEK	69
	SEZNAM PŘÍLOH	70
	PŘÍLOHA A	71
	PŘÍLOHA B	74

SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLŮ

Značka	Veličina	Jednotka
A_5	Tažnost	[%]
CVD	Chemické povlakování	
D	Průměr	[mm]
E	Modul pružnosti	[GPa]
HB	Tvrdost podle Brinella	[HB]
I	Proud	[A]
PVD	Fyzikální povlakování	
R_a	Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu	[μm]
R_m	Mez pevnosti	[MPa]
$R_{p0,2}$	Smluvní mez kluzu určená z trvalé deformace pod zatížením	[MPa]
RTG	Rentgen	
R_q	Průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu	[μm]
R_z	Největší výška profilu	[μm]
SK	Slinutý karbid	
TOO	Tepelně ovlivněná oblast	
U	Napětí	[V]
VBD	Vyměnitelná břitová destička	
X - ray	Rentgenové záření	
a_p	Hloubka řezu	[mm]
f	Posuv	[mm]
f	Frekvence	[Hz]
d	Průměr	[mm]
Δl	Prodloužení	[mm]
v	Rychlost šíření	[$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
v_c	Řezná rychlost	[$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$]
$\Theta_{1,2}$	Teplota	[°]
λ	Vlnová délka	[nm]
σ	Normálové napětí	[MPa]
τ	Smykové napětí	[MPa]
ψ	Úhel orientace	[°]

ÚVOD

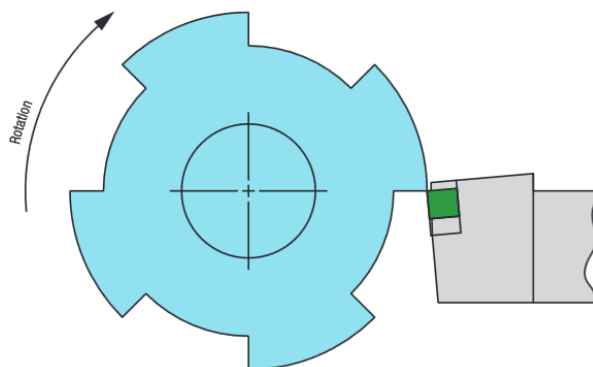
V současnosti dochází stále k vývoji výrobních strojů a řezných materiálů. Je zde kladen důraz na produktivitu práce, snížení výrobních časů, ale také na kvalitu obrobeného povrchu součástí. Na základě experimentů lze říci, že řezné podmínky, ať už se jedná o řeznou rychlost, geometrii řezného nástroje nebo typ technologie, ovlivňují kvalitu povrchové vrstvy materiálu. Do kvality obrobeného povrchu můžeme zařadit jakost (drsnoti, rozměrová a tvarová přesnost), tak i integritu povrchu (zbytková napětí, tvrdost, mikrostruktura materiálu).

Důležitým prvkem integrity povrchu jsou zbytková napětí, která vzniknou v průběhu vlastního procesu obrábění a současně jsou v materiálu obsažena vlivem předchozího způsobu výroby. Tato napětí se v materiálu vyskytují buď jako tlaková nebo tahová. Optimální stav povrchové vrstvy je ten, kdy napětí jsou nulová. Napětí tlaková – vykazující malé hodnoty normálového napětí jsou přijatelná. Pokud ovšem bude dosaženo záporných hodnot – napětí takových, může dojít k brzkému narušení celistvosti součásti, až k jejímu vyřazení z provozu. Zbytková napětí nám ovlivňují nejen mechanické vlastnosti materiálu, ale také způsobují například korozi, proto je důležité znát velikost a charakter zbytkového napětí.

Tato diplomová práce se zabývá vyhodnocením a porovnáním zbytkového napětí při obrábění na simulátoru přerušovače řezu při vstupu nástroje do materiálu a výstupu z něj u dvou různých ocelí. V práci jsou popsány zkoušky přerušovaného řezu a metody vyhodnocující zbytková napětí. Samotný experiment se skládá ze dvou částí. V první je popis přípravku, který byl využit pro experiment spolu s návrhem řezných parametrů obrábění. Část druhá je zaměřena na vyhodnocení zbytkového napětí pomocí rentgenové difrakce.

1 PŘEHLED ZKOUŠEK PŘERUŠOVANÝM ŘEZEM

Přerušovaný řez je proces, kdy nástroj není v neustálém kontaktu s obrobkem. Během procesu dochází k mechanickému a teplotnímu zatěžování, které má negativní vliv na integritu řezné hrany nástroje, produktivitu a celkově na celý proces obrábění. [16]



Obr. 2.1 – Příklad přerušovaného řezu [22]

Metoda přerušovaného řezu umožňuje zaznamenat obraz ukončeného procesu tvorby třísky a stav povrchu obráběného materiálu ve chvíli, kdy do procesu zasahuje řezný nástroj. Touto metodou lze získat kořen třísky a následně vyhodnocovat a stanovovat požadované veličiny související s procesem. Přerušovače řezu z funkčního hlediska lze rozdělit na **přerušovače s přerušením na straně obrobku** a na **přerušovače s přerušením na straně nástroje**. [3,15]

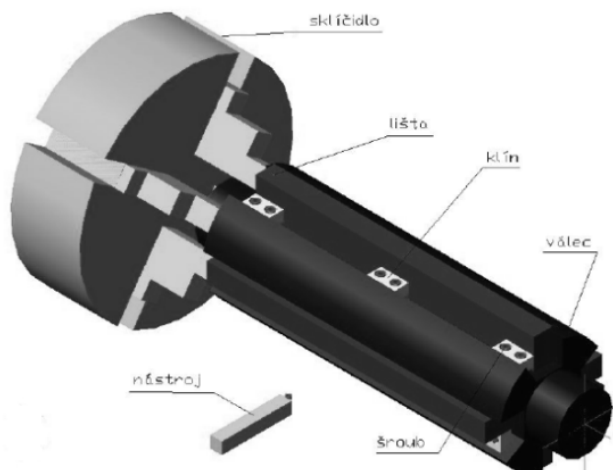
Zkoušky pro přerušovaný řez:

- podélné soustružení s válcem se vsazenými lopatkami,
- podélné soustružení s podélnými drážkami,
- čelní soustružení s válcovými čepy,
- čelní frézování se silně přerušovaným řezem,
- hoblování (obrážení).

1.1 Podélné soustružení s válcem se vsazenými lopatkami

Jedná se o zkoušku, kdy přípravek má tvar válce a je upnut do sklíčidla soustruhu s podepřením upraveného hrotu. Do válce jsou vsazeny lišty - lopatky daného materiálu, které jsou uchyceny pomocí upínacích klínů. Počet lišt se odvíjí dle

konstrukce přípravku – 2, 4 nebo více. Nástroj je pak vystaven určitému počtu mechanických a teplotních rázů během záběru (za jednu otáčku). V odborné literatuře je tato zkouška nazývána jako „**lišťový test**“. Na obrázku 2.2 je schéma lišťového testu. [17, 19, 21]

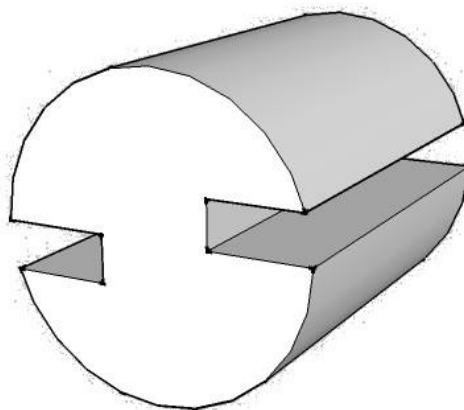


Obr. 2.2 – Schéma přípravku pro lišťový test [18]

Kritérium odolnosti břítu je stanoveno počtem hřebenovitých trhlin. Tyto trhliny po čase způsobí destrukci břítu. Pokud daný břit překoná předem stanovenou mezní hodnotu rázů, vzorek je pak považován za úspěšný. U zkoušeného obrobku je úhel záběru konstantní, tedy i velikost mechanického rázu během celé zkoušky je stálá. Doba ochlazování je delší než doba záběru. Nevýhodou této zkoušky je výroba náhradních lopatek, které jsou vyrobeny frézováním. [17]

1.2 Podélné soustružení s podélnými drážkami

Přípravek pro tuto zkoušku má v podélném směru vyfrézované obvykle dvě drážky (opět záleží na konstrukci přípravku). Při této metodě je obrácený poměr doby záběru břítu a ochlazovací fáze oproti metodě s lopatkami. Je zde kratší doba ochlazování, proto nedochází k tak velkému kolísání teploty břítu, tzn.: dochází ke vzniku menších teplotních rázů. Pak vznik hřebenovitých trhlin není tak výrazný jako u lopatek. Zkouška se však pak stává náročnější. Schéma přípravku s dvěma podélnými drážkami je uvedeno na obrázku 2.3. [17]

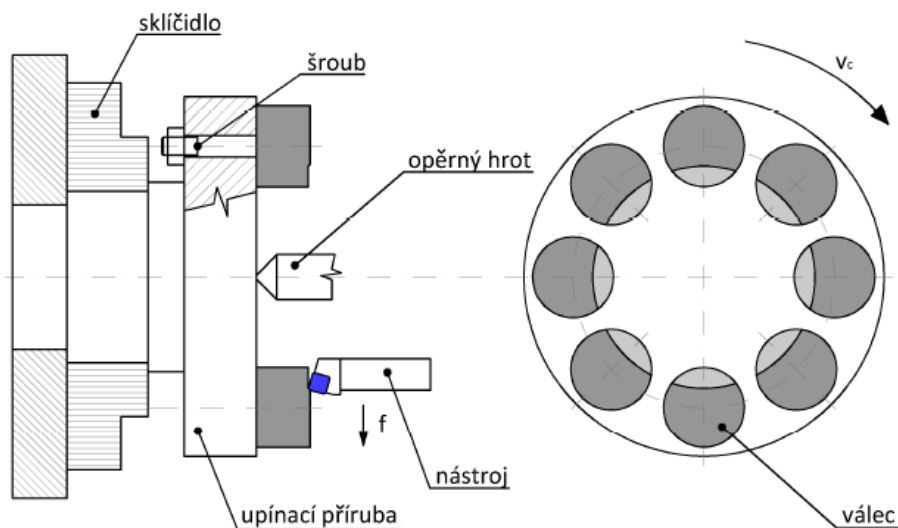


Obr. 2.3 – Schéma přípravku s dvěma podélnými drážkami [21]

1.3 Čelní soustružení s válcovými čepy

U této zkoušky se jedná o čelní soustružení osmi válcových čepů (jejich počet se může lišit), které jsou uchyceny na čele příruby po jejím obvodu. Příruba je upnuta pomocí sklíčidla na soustruhu. Nástroj během jedné otáčky je pak v případě 8 čepů vystaven osmi teplotním a osmi mechanickým rázům. Průběh zkoušky lze ovlivnit změnou posuvu a hloubkou řezu.

Během procesu obrábění dochází postupně ke změně délky doby řezání a doby, kdy se břit nachází mimo záběr – změna velikosti teplotních rázů. Tyto rázy následně způsobují vznik mikroskopických trhlin v břitu, které se šíří, až dojde k úplné destrukci břitu. Díky vyšší frekvenci rázů je dosaženo rychlejší destrukci břitu, proto se jedná o metodu jak časově, tak i materiálově málo náročnou. Schéma je uvedeno na obrázku 2. 4. [17, 20]

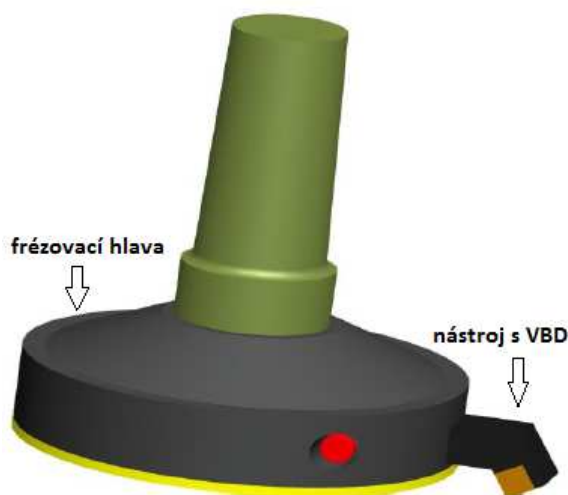


Obr. 2.4 – Schéma čepového testu [19]

1.4 Zkouška čelního frézování

Pro vyhodnocení odolnosti VBD proti teplotním a mechanickým rázům je možno využít i zkoušky čelního frézování se silně přerušovaným řezem. V případě této zkoušky se přípravek skládá z několika desek, které jsou uchyceny pomocí mezivložek, přičemž v jejich mezerách dochází k přerušení řezu. VBD je vystavena takovému množství rázů, jako je počet desek. Úhel záběru se zde pohybuje jak v pozitivních, tak v negativních hodnotách. Odolnost je opět hodnocena dle počtu rázů do znehodnocení bříty. V případě zkoušky čelního frézování je hodnocen hlavně vliv mechanického rázu na odolnost destičky. Schéma zkoušky je opět znárodněno na obrázku 2.5. [17]

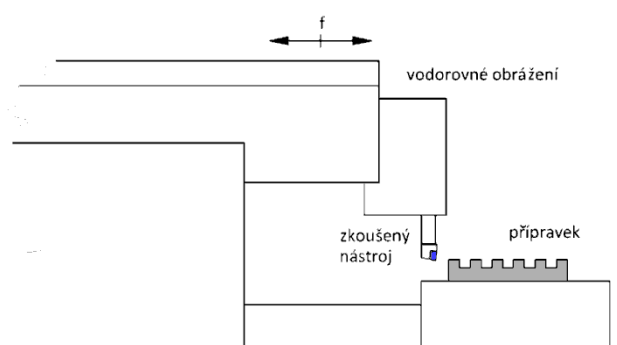
Nevýhodou této metody je velká spotřeba obráběného materiálu. To ovšem lze omezit volbou menšího počtu VBD, které jsou upnuty symetricky ve frézovací hlavě. Výhodou metody je konstantní hladina chvění. [18]



Obr. 2.5 – Schéma zkoušky čelního frézování [18]

1.5 Zkouška vodorovného obrážení

Během zkoušky vodorovného obrážení je proveden přerušovaný řez pomocí přímočarého pohybu a v rozmezí nízkých řezných rychlostí. Na stole je upnut přípravek, na kterém jsou zhotoveny drážky kolmé na směr pohybu smýkadla. Nevýhodou metody je nedostatečná tuhost obrážečky. To způsobuje zvýšené chvění. Vyhodnocení metody je na stejném principu jako u zkoušky čelního frézování. Schéma zkoušky je uvedeno na obrázku 2.6. [18]



Obr. 2.6 – Schéma zkoušky vodorovného obrazy [21]

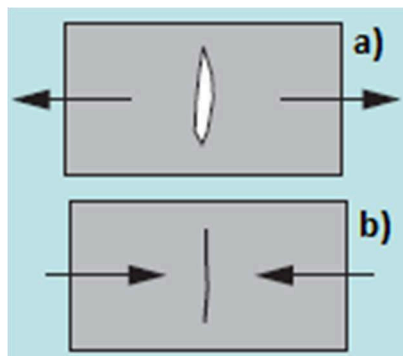
2 POVRCHOVÁ NAPĚTÍ

Během procesu obrábění dochází ke vzniku napěťového pole, které způsobí deformace ovlivňující vlastnosti materiálu. Jedná se hlavně o změny probíhající v povrchové vrstvě, a to strukturní změny, vady zpevnění, zbytková pnutí, aj. Napětí mohou být tahová (-) nebo tlaková (+). Jejich rovnovážný stav je určen koexistencí napětí různého smyslu a velikostí, tak i pružnými vlastnostmi materiálu. [2]

Zbytková pnutí jsou důležitá a velmi ovlivňují vlastnosti součástí jak z pohledu pevnostního, tak i únavového. Mohou být definována jako napětí, která zůstanou v materiálu během zpracování a po výrobě bez přítomnosti dalších vnějších sil, nebo teplotních gradientů. Výrobní procesy jsou nejčastější příčiny, které je způsobují. Jedná se prakticky o všechny výrobní procesy, jako je svařování, lití, obrábění, tváření, aj. Zbytková pnutí se mohou také objevit v průběhu provozu součástí. Jejich vznik se projevuje jen v takovém materiálovém objemu, kde je možno vyvolat plastickou deformaci. Díky nim může nastat relaxace materiálu nebo dokonce jeho porušení vlivem stárnutí, snížení meze kluzu apod. [5,6]

Zatímco od pnutí, která jsou vyvolána vnějším zatížením, zbytková jsou velmi těžko předvídatelná. Z toho důvodu je velmi důležité mít spolehlivou metodu, díky které je lze přímo změřit s minimálním poškozením povrchu. [6]

Celkové napětí ve zkoušeném materiálu v daném místě je rovno zbytkovému napětí a napětí aplikovanému. Tedy je-li materiál se zbytkovým napětím – 400 MPa vystaven mechanickému zatížení o 500 MPa, pak výsledné napětí je 100 MPa. Proto znalost zbytkové napjatosti je důležitá. Obecně platí, že tlaková napětí na povrchu vzorku je prospěšné. To vede ke zvýšení únavové životnosti a pevnosti, pomalé šíření trhlin a snížení náchylnosti na korozní praskání. Tahová napětí je nežádoucí, protože snižuje odolnost proti únavě a zvyšuje tření a šíření trhlin. [9]



a) Tahová napětí – otevřená trhlina, šíření trhliny
b) Tlaková napětí – uzavřená trhlina, pomalé šíření

Obr. 3.1 – Napětí [30]

2.1 Základní mechanismy vzniku zbytkového napětí

▪ Nerovnoměrná plastická deformace

Nerovnoměrná plastická deformace se projevuje u technologických procesů, kdy došlo k přetváření povrchové vrstvy materiálu. Během procesu nedochází k výrazným změnám teploty. Při působení řezného klínu na materiál dojde v tenké vrstvě k plastické deformaci. Zvětšování objemu plasticky deformované vrstvy způsobuje přitlačení dotykových nedeformovaných vrstev základního materiálu – vrstev, které jsou pružně zdeformovány. Po ukončení procesu je snaha těchto vrstev se zpět vrátit do původní polohy a začnou působit na vrchní, plasticky deformovanou vrstvu tlakem. To vše způsobí vyvolání **tlakového zbytkového pnutí**. [32]

▪ Teplotní roztažnost během nerovnoměrného ohřevu nebo ochlazení

Zbytková pnutí také mohou vznikat při nerovnoměrném ohřevu, popřípadě ochlazení materiálu. Při ohřevu povrchové vrstvy materiálu z teploty θ_1 na teplotu θ_2 dojde k prodloužení materiálu o Δl . Z důvodu zvyšující teploty se modul pružnosti materiálu E zmenšuje. Při dosažení požadované teploty je materiál plně plastický a napětí jsou nulová. Jakmile nastane ochlazování vrstvy, materiál se začne smršťovat, k plastické deformaci a ke vzniku **tahových vnitřních napětí**. Tato napětí jsou větší než napětí tlaková působící při ohřevu vrstvy, protože modul pružnosti chladné vrstvy je větší jako modul pružnosti v ohřátém stavu. [23]

▪ Strukturní změny materiálu spolu se změnou objemu

Dalším mechanismem tvorby zbytkových napětí jsou změny strukturní vrstvy materiálu. Tento mechanismus se projevuje pouze v kovech a slitinách, u kterých dochází k fázovým přeměnám. Zde se vychází z podmínek, že řezný klín je ideálně ostrý a tloušťka třísky se zatlačuje do obrobeného povrchu. Pružno – plastické deformace, které jsou vyvolány řezným klínem, ovlivňují povrch i pod obrobeným povrchem. Následně při plastické deformaci kovu klesá jeho hustota a roste řezný odpor. Při zvýšení měrného objemu v povrchové vrstvě vznikají **tlaková zbytková pnutí**. [23]

▪ Chemické procesy (difuze, řezné prostředí).

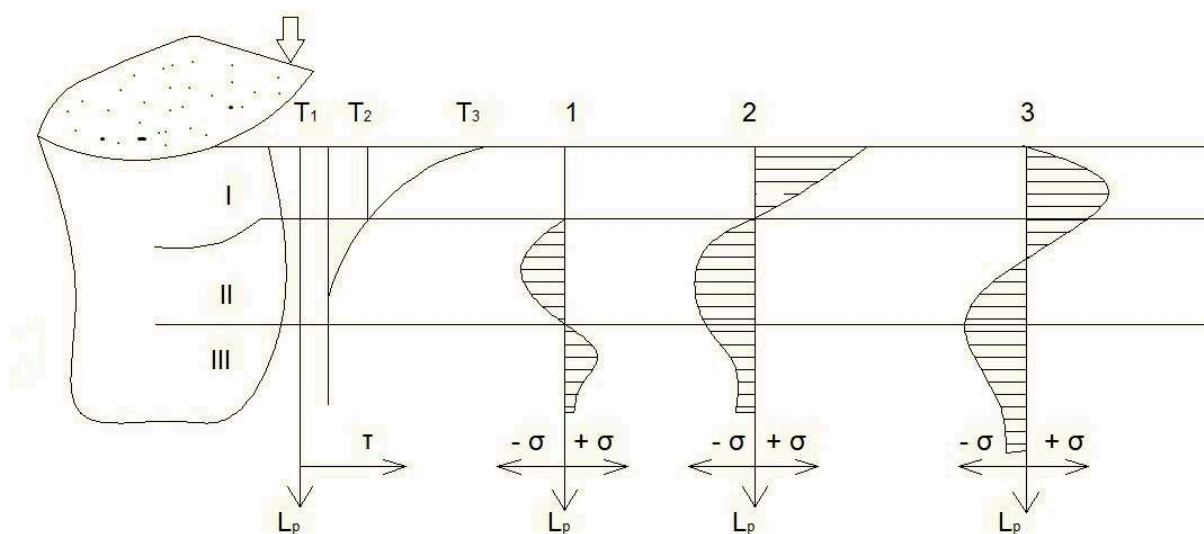
Po skončení procesu obrábění se mohou vyskytnout následující případy vzniku zbytkových pnutí

- **Povrchová vrstva je zatěžována mechanicky**

Při mechanickém a tepelném zatěžování je povrchová vrstva, její horní nejteplejší část, plasticky zkrácena. Během řezání a následného ochlazování dochází ke vzniku tahových pnutí. Ta negativně působí na funkční vlastnosti povrchu, a to vznikem únavových lomů a trhlin. Skutečný průběh zbytkových pnutí při vysokých teplotách řezání je znázorněn ve třetí situaci na obrázku 3.2. Projevuje se to hlavně při broušení, ale také při soustružení a frézování vysokými rychlostmi. Na kvalitu vrstvy má největší vliv poslední technologická operace. Avšak chybně sestavený sled operací může mít vliv na vrstvy z předchozích operací. [1, 2]

- **Povrchová vrstva je zatěžována mechanicky a tepelně**

- **Povrchová vrstva je zatěžována mechanicky, tepelně a dochází ke změně struktury. [1]**



Obr. 3. 2 – Průběh zbytkových pnutí [1]

Tyto mechanismy, tepelný a mechanický, je možno zkombinovat se **změnami struktury nebo s chemickými procesy**. Dochází buď ke zvětšení objemu materiálu, kterému brání okolní neovlivněný materiál, a to způsobuje tlak. Nebo naopak dojde ke zmenšení objemu materiálu, pak dojde ke vzniku tahu v materiálu.

Průběh zbytkových pnutí v materiálu v povrchové vrstvě je velmi složitý a během technologických operací mohou být zúčastněny všechny čtyři mechanismy. [2]

2.2 Důsledky zbytkové napjatosti

Zbytková pnutí je možno rozdělit na „užitečná“ a „škodlivá“. „Užitečná“ pnutí jsou využívána například při metodě kuličkování – cyklické namáhání součástí, které způsobuje prodloužení životnosti.

Negativní pnutí způsobují vznik trhlin, napěťovou korozi, snížení meze únavy, atd. Tahová napětí jsou vyvolána například fázovými transformacemi a chladnutím svarů, které podporují vznik trhlin, aniž by došlo k vnějšímu působení sil. Úlohou konstruktérů a technologů je, aby navrhli takový typ konstrukce a technologii výroby při které dojde ke snížení jejich velikostí. Snaha využít žíhání na snížení vnitřního pnutí je ne vždy efektivní a účinek může nastat opačný. [7]

2.3 Povlakování nástrojových materiálů

V současné době je hodně využíváno vysokorychlostního obrábění. Také nelze opomenout vlivy působící na obrábění jako je prostředí rezného procesu. Vše je spojeno se správnou volbou nástroje. Zde musí dojít ke zvýšení odolnosti proti opotřebení, kde se projevují jeho různé mechanismy a to vede až k degradaci nástroje. Pro řešení tohoto problému je využito povlakování nástroje. Záleží zde na typu povlaku, tvorbě povlaku a struktuře jednotlivých vrstev. [8]

Zbytková pnutí se projevují i v povrchové vrstvě substrátu povlakovaného nástroje. Tahová napětí se projevují při CVD povlacích. Tlaková naopak při volbě PVD povlaku při tloušťce ($2 \div 5$) μm . Leštění nám odstraňuje vrstvu karbidů WC a výrazně snižuje zbytková pnutí. Mikro - zpevňování před samotným povlakováním velmi ovlivňuje napětí v substrátu. [8]

2.4 Zbytková napětí během svařování

Svařování spadá mezi důležité procesy výroby součástí v průmyslu. Jak bylo již zmíněno, zbytková pnutí jsou vyvolána procesy, jako je svařování. Vzniknou v průběhu tuhnutí svarového kovu a chladnutí na teplotu okolí. V důsledku vysokého tepelného příkonu do materiálu dochází ke vzniku nerovnoměrného tepelného rozložení, plastické deformace a fázové transformace v materiálu. Tyto změny zajišťují vznik různých druhů zbytkových pnutí v oblasti svaru a tepelně ovlivněné oblasti (TOO). V oblasti svaru jsou napětí většinou tahová. Zbytková pnutí v TOO, kde dojde k překročení teploty přes její kritickou hodnotu, v transformovaných oblastech jsou tlaková. [14]

2.5 Klasifikace zbytkových napětí

Zbytková pnutí se dají charakterizovat podle několika hledisek. Dle velikosti objemů, kde se velikost napětí, ani jeho směr nemění, jsou rozdělena podle Macheraucha a Tietze na:

- pnutí I. druhu – makroskopická,
- pnutí II. druhu – mikroskopická,
- pnutí III. druhu – submikroskopická. [7]

▪ Zbytková pnutí I. druhu – makroskopická

Jedná se o napětí, která jsou navzájem v rovnováze ve velkých objemech. Vytvářejí se v těle součástí.

Příčiny vzniku zbytkových napětí I. druhu:

- různé výrobní technologie,
 - obrábění (broušení, soustružení, frézování, vrtání),
 - spojování (svařování, měkké, tvrdé pájení, lepení),
 - lití,
 - tváření (tažení, válcování za studena, kování, tlacení, lisování),
 - tepelné, tepelně – mechanické zpracování (kalení, cementování, nitridování),
 - tvorba krycích vrstev – povlaky (galvanizace, plátování, potahování, zinkování).
- montážní, dopravní, provozní, zkušební zatížení různého charakteru.[7]

▪ Zbytková pnutí II. druhu – mikroskopická

Tato napětí jsou v rovnováze v mikroobjemech (v krystalech a jejich částech). Představují rozdíly mezi zbytkovým napětím I. druhu a středními hodnotami zbytkových napětí v jednotlivých zrnech. [12]

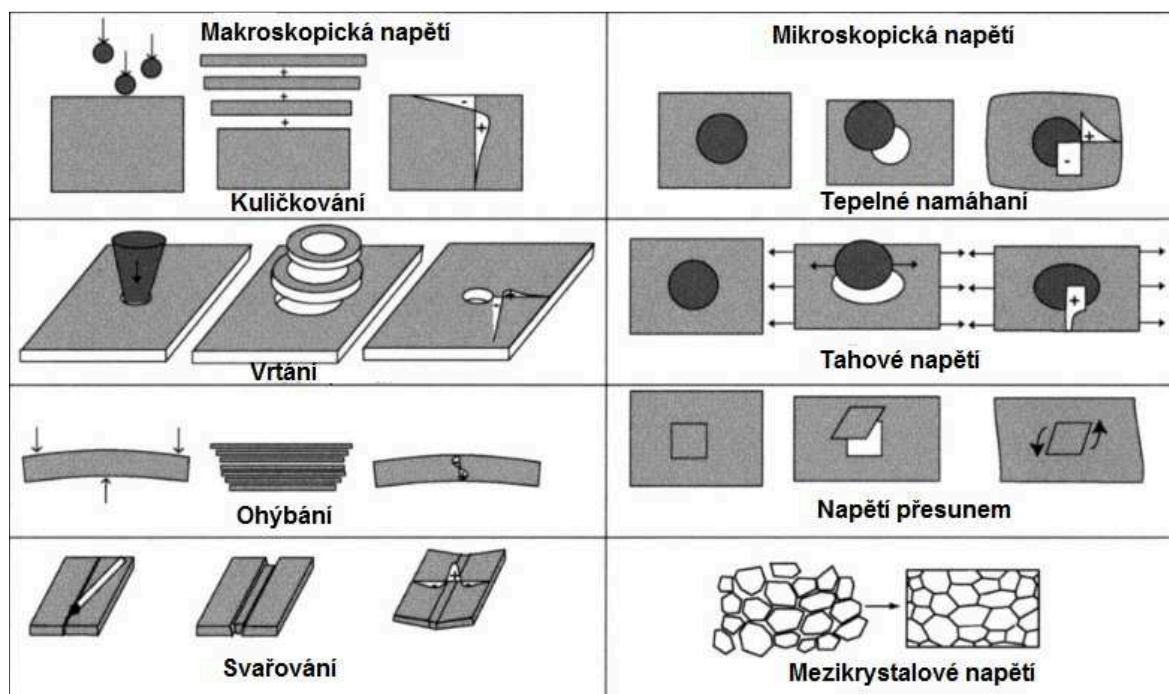
Příčiny vzniku zbytkových napětí II. druhu:

- během tepelných procesů v materiálech, které mají rozdílné teplotní součinitele délkové roztažnosti,
- během deformace materiálu, který je složen z jedné fáze nebo z více fází s různými mechanickými vlastnostmi. [7]

▪ Zbytková pnutí III. druhu – submikroskopická

Submikroskopická pnutí jsou způsobena poruchami krystalické mřížky – bodové (vakance, intersticiály, nečistoty), čárové (dislokace, hranové, šroubové, smíšené) a plošné (hranice zrn, vrstvené chyby). Jsou nehomogenní i meziatomových vzdáleností. Dohromady s II. druhem pnutí hrají významnou roli na mechanických a fyzikálních vlastnostech materiálů. [3, 7]

V některých případech mohou být zbytková pnutí I. a II. druhu nulová, zbytková jsou pnutí III. druhu jsou naopak vždy nenulová. Znalost charakteristik těchto napětí je velmi důležitá jako pro konstruktéry, tak i pro výpočtáře. U kovových materiálů je důležité se soustředit na makroskopická pnutí, a pnutí II. a III. druhu jsou nepodstatná. [7]



Obr. 3.3 – Průběhy makro-, mikroskopických napětí [9]

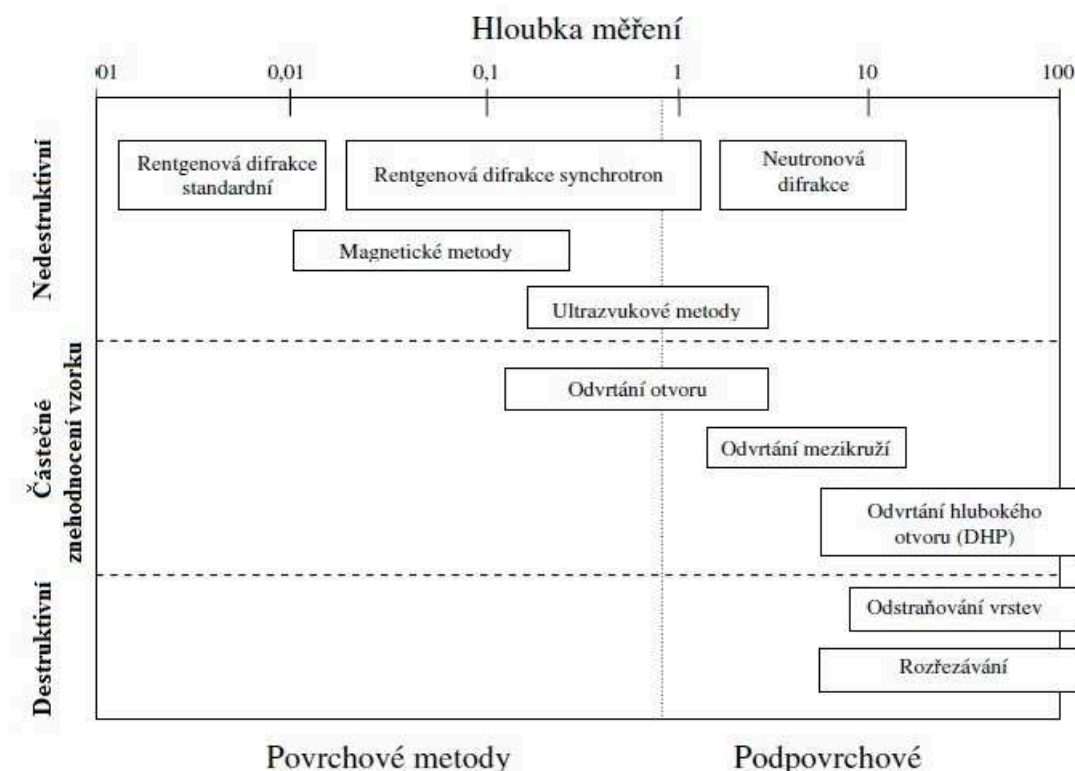
2.6 Experimentální metody pro měření zbytkových pnutí

Pro zjišťování velikostí zbytkových pnutí bylo vyvinuto hned několik experimentálních metod. Všechny tyto metody jsou zdlouhavé, náročné na měření a techniku nebo jsou nepřesné. Při měření danou metodou může dojít až ke znehodnocení daného vzorku. [13]

Rozdělení metod z hlediska celistvosti zkoumaného vzorku:

- **destruktivní metody** – úplné znehodnocení vzorku,
- **semidestruktivní metody**, kdy dojde k částečnému znehodnocení vzorku, které však nemá vliv na jeho funkčnost,
- **nedestruktivní metody**. [7]

Na obrázku je zobrazeno rozdělení metod dle celistvosti zkoumaného vzorku, hloubka použití dané metody, a zda se jedná o metodu povrchovou nebo podpovrchovou.



Obr. 3.4 – Rozdělení metod z hlediska celistvosti [4]

Rozdělení podle principu měření:

- mechanické metody (metoda odvrtání otvoru),
- fyzikální metody (ultrazuková metoda, magnetická metoda, neutronová difrakce),
- chemické metody (difuze vodíku, koroze pod napětím). [7]

Rozdělení podle charakteru napjatosti:

- na povrchu tělesa (jednoosá, dvouosá – rovinná),
- v daném objemu tělesa (trojosá – prostorová). [7]

V následující tabulce je uveden přehled experimentálních metod pro měření zbytkových pnutí.

Tab. 1 – Přehled metod pro měření zbytkových pnutí [10]

Metoda zjišťování zbytkových pnutí	Tvar součásti	Způsob měření	
Mechanická	Plochý tvar	Deformace pásků	Změna délky
			Změna zakřivení
		Vrtání děr	Válcová díra
			Mezikruží
	Rotační tvar	Změna rozměru válce	Odstranění povrchové vrstvy
		Trubka	Rozříznutí trubky
			Odstranění povrchové vrstvy
			Odstranění vnitřní vrstvy
		Kroužek	Rozříznutí
			Změna křivosti
			Podélné pásy z kroužků
	Obecný tvar	Metoda sítí	Deformace sítě
		Křehké laky	Vznik trhlin
		Křehké modely	Vznik trhlin
Fyzikální RTG	Obecný tvar	Difrakce	Vzdálenost meziatomových rovin
Fyzikální ultrazvuk		Šíření vln	Změna rychlosti
			Odraz vln
			Vnitřní tlumení
Elektrické	Obecný tvar	Změna proudu	Změna potenciálu procházejícího proudu
			Změna velikosti vířivých proudů
			Změna indukčního toku
Magnetické	Obecný tvar	Změny magnetismu	Magnetická indukce
			Zbytkový magnetismus
Akustické	Obecný tvar	Prozvučitelnost	Četnost akustických emisí
Chemické	Obecný tvar	Difuze vodíku	Trhliny na povrchu
		Změna chemické aktivity	Změna struktury

2.6.1 Mechanické metody

Tyto metody jsou nazývány jako metody napětovo – relaxační, které analyzují dané vlastnosti v odebrané části vzorku. Po mechanickém zásahu je rovnováha zbytkového napětí porušena a dojde k jeho částečnému uvolnění. Tato

metoda je využívána pro zjišťování makroskopických napětí. Průběh zjišťování lze rozdělit do třech částí:

- 1) odstranění části materiálu vzorku,
- 2) změření deformace, popř. délkového přetvoření,
- 3) vyhodnocení co do velikosti a směru zbytkových pnutí. [7,14]

Do této kategorie spadá několik různých metod, které jsou využívány pro různé tvary těles. Níže jsou uvedeni zástupci, kterých je nejvíce využíváno v průmyslu.

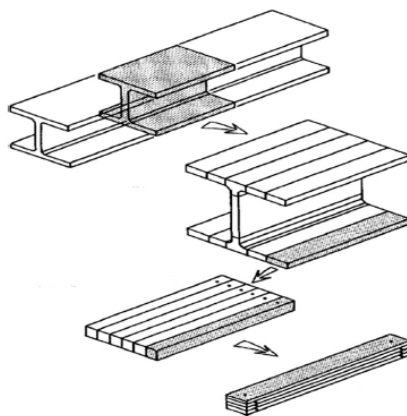
▪ **Metoda odstraňování vrstvy materiálu**

Principem metody odstraňování vrstvy materiálu je postupné odstraňování povrchové vrstvy materiálu tělesa. V průběhu toho dochází k porušení podmínek rovnováhy vnitřních sil. Výsledkem je pak deformace tělesa – průhyb. V každé tloušťce odebrané vrstvy je určena střední hodnota zbytková napětí. Z důvodu vysokých gradientů napětí musí být tloušťky vrstev podstatně malé. Proto je zde často využíváno chemických nebo elektrochemických metod opracování povrchu. [7]

▪ **Dělicí metody**

Princip dělicí metody spočívá v měření deformace v důsledku uvolnění zbytkového napětí při odstraňování materiálu ze vzorku. Nejstarší z těchto metod je datována roku 1911, kdy bylo využíváno konstrukčních uhlíkových ocelí, hliníku a nerezových profilů. V prutech bylo vyšetřováno osově zbytkové napětí díky změny délky při postupném zmenšování vnějšího průměru. [7,14]

Metoda spočívá v dělení tělesa na několik částí a následné vyřezávání různých tvarů. Během procesu je důležité, aby nedošlo k působení vlivu tepelných účinků. Na níže uvedeném obrázku je zobrazen sled řezů I – nosníku pro vyhodnocení zbytkových pnutí. Pásky uvolněné během procesu dělení mohou vykazovat axiální deformace a zakřivení. [14]



Obr. 3.5 – Dělicí metoda [14]

▪ Odvrtávací metoda

Jako zástupce z kategorie metod, kdy dojde k částečnému znehodnocení vzorku, byla zvolena metoda odvrtávací. Tato metoda je založena na **vyvrtání otvoru**, popřípadě **mezikružší (Ring Core)**.

Tato metoda je relativně jednoduchá a rychlá. Díky tomu je také nejčastější metodou pro zjišťování velikosti zbytkových pnutí. Do materiálu je zhotoven otvor o malém průměru (1 – 4 mm) do hloubky jedenkrát D. V tu chvíli dojde k částečnému uvolnění zbytkových pnutí. Vzniklé deformace jsou změřeny na povrchu vzorku a na základě teoretických nebo experimentálně určených kalibračních koeficientů jsou vyhodnoceny zbytková pnutí co do velikosti, tak i směru. [4, 7, 10, 14]

Při volbě odvrtávání mezikružší je ke změření zbytkového pnutí využito tenzometrické růžice, která je upnuta uprostřed zbylého sloupku. Při využití této metody je výhodou to, že dojde k úplnému uvolnění zbytkových pnutí. Jsou zde změřena skutečná napětí bez ovlivnění koncentrátorem napětí. Průměr sloupku se pohybuje v rozsahu (15 – 150) mm s hloubkou (0,25 – 1,5) mm. [7]

Postup metody:

- v místě vyšetřování zbytkových pnutí je nainstalována tenzometrická družice,
- nad družici je připevněn vyvrtávací přípravek ve středu družice (maximální požadavky na úchytky tvaru a polohy,
- provede se nulové čtení,
- při postupném vrtání do hloubky se průběžně odečítají hodnoty,
- vyhodnocení velikosti a směru hlavních pnutí a redukovaných pnutí v jednotlivých hloubkách pod povrchem. [7]

Na obrázcích níže je znázorněno zařízení, které je využíváno pro odvrtávání do hloubky 4 mm a zařízení pro odvrtávání mezikruží pro průměr sloupku 14 mm. Celistvost této metody je dosažena v intervalu (0,5 – 2) mm pod povrchem. Při dosažení hloubky 8 mm zbytková pnutí nejsou změřitelná. [4]



Obr. 3.6 – Odvrtávací metoda [4]



Obr. 3.7 – Metoda mezikruží [4]

2.6.2 Fyzikální metody

Fyzikální metody jsou bezesporu metody nedestruktivní. Zde se provádí měření zbytkových pnutí v závislosti na jejich krystalografických vlastnostech daného materiálu. Tyto metody jsou založeny na stanovení pružné deformace, které způsobují změny v mezivinné vzdálenosti. [14]

▪ Ultrazvuková metoda

Ultrazvukem definujeme zvukové kmity o frekvenci větší než 20 kHz a vlnové délky ($1,6 - 0,3 \cdot 10^{-6}$) m. V oboru defektoskopie se frekvence pohybuje v rozsahu (1 -25) MHz. Dle směru šíření jsou ultrazvukové vlny rozděleny na:

- podélné,
- příčné,
- povrchové,
- deskové. [12]

Z nedestruktivních metod pro zjišťování zbytkových pnutí je velmi oblíbená metoda za použití ultrazvuku. Princip metody spočívá v lineární změně rychlosti šíření zvuku v kovech v závislosti na namáhání. Jsou zde využívány podélné nebo příčné polarizované vlny. Tento jev je nazýván **akustoelastickým jevem**. Tato metoda není omezena materiálem. [4, 7, 14]

Mezi rychlostí šíření vln, jejich vlnovou délkou a frekvencí platí vztah:

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (3.8)$$

λ - vlnová délka [m]

v - rychlost šíření [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

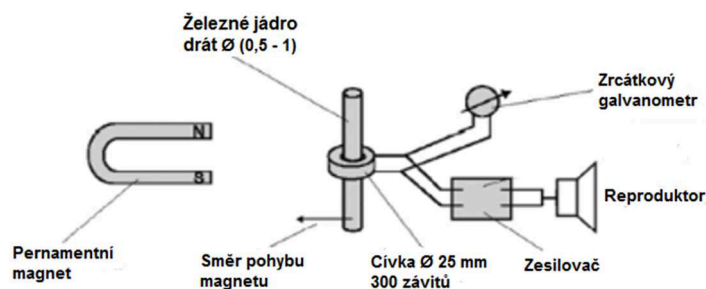
f - frekvence [Hz]

Pro zkoušení ultrazvukovou metodou je možno využít **impulzní odrazové metody** nebo **průchozí ultrazvukové metody**. Výsledky při použití této metody nejsou vždy přesné. Důvodem toho jsou faktory ovlivňující metodu, jako jsou: tvrdost, krystalická textura, hustota dislokací, složení a přítomnost různých fází. Naopak v některých případech může dojít k tomu, že tyto faktory jsou tak malé, že nedojde ke zkreslení výsledků. Metoda nabízí vysokou rychlost zpracování dat, přenosnost, příznivou cenu zařízení. [7,12]

▪ Magnetické metody

Magnetické metody jsou založené na analýze souvislosti mezi napjatostí a magnetickými vlastnostmi nebo projevy zaznamenanými při magnetizaci. Jedná se o nedestruktivní metodu. Metoda je využitelná pro zjišťování zbytkových napětí pouze pro feromagnetické materiály. Výhodou metody je vysoká schopnost automatizace a rychlost vyhodnocení požadovaných charakteristik. Buď je zde využito principu **Barkhausenova šumu** nebo **magnetostrikčního jevu**. [7,29]

Metoda Barkhausenova šumu je využívána k hodnocení integrity povrchu. Přiblížením/oddálením magnetu od jádra je zaznamenáno hlasité chrastění. Souvislost to má při magnetování feromagnetických materiálů. Na obrázku je popsáno původní Barkhausenovo uspořádání. Rozložení a samotná přítomnost napětí v materiálu mají velký vliv na intenzitu šumu. Při běžných aplikacích se měřená hloubka pochybuje mezi (0,01 až 1,5) mm. Tlakové napětí v materiálu intenzitu šumu snižuje, zato napětí tahové intenzitu zvyšuje. [7, 11]

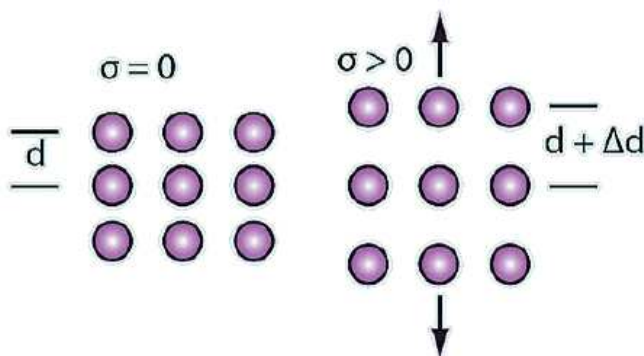


Obr. 3.8 – Původní uspořádání Barkhausenova šumu [11]

▪ Rentgenografická difrakční metoda

RTG metoda patří mezi nejvyhledávanější metody, i když se nejedná o metodu nejsnadnější. Rentgenové záření je definováno jako elektromagnetické vlnění s vlnovou délkou ($10^{-12} - 10^{-8}$) m. Principem je určení mřížkové deformace a následně jejího přepočtu na napětí díky teorie elasticity. [7]

Podstata využití rentgenové difraktometrie na měření zbytkových napětí je to, jak ovlivňují strukturu polykrystalického materiálu a vzdálenost krystalografických rovin. Pokud napětí je nulové, vzdálenost rovin je závislá jen na vlastnostech materiálu. Za působení zbytkových napětí se tyto vzdálenosti mohou měnit, což je znázorněno na obr. 3.9. Při využití této metody je potřeba odborná kvalifikace pracovníků a vysoké požadavky na přístrojové vybavení. Nevýhodou je omezená použitelnost na polykrystalické materiály. [7, 12, 14]

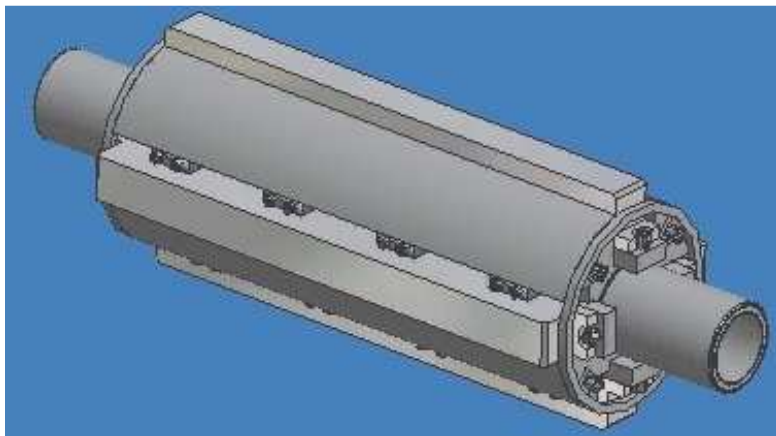


Obr. 3.9 – Schéma závislosti vzdálenosti krystalografických rovin od zbytkového napětí [29]

Princip difrakce využívá i metoda zjišťování zbytkových napětí neutronovou difraktometrií. Namísto rentgenového paprsku je zde využit svazek monochromatického záření tepelných neutronů, které jsou generované v jadrovém reaktoru. Výhodou této metody oproti X – ray je, že je možné měřit napětí ve větších hloubkách. [29]

3 NÁVRH EXPERIMENTU

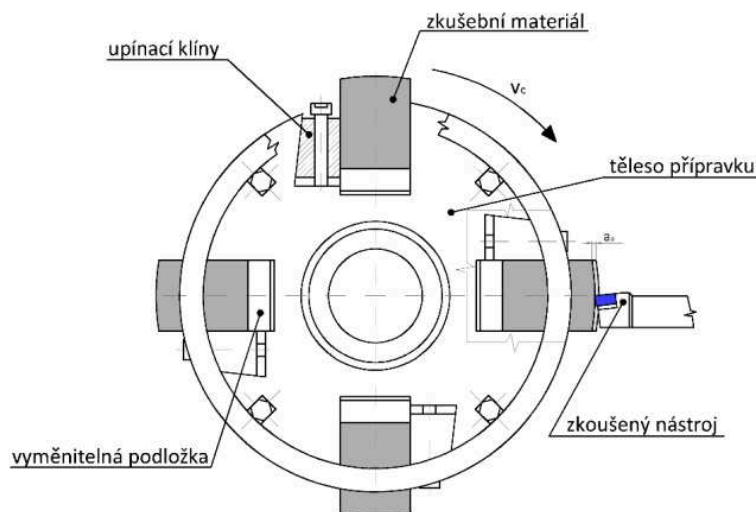
Pro náš experiment byla zvolena zkouška podélného soustružení, neboli „lišťový test“. Jedná se o zkoušku probíhající na speciálním přípravku – simulátor přerušovaného řezu, který je upnut do sklíčidla soustruhu a podepřen otočným hrotem. Přípravek byl zkonstruován na Katedře obrábění, montáže a strojírenské metrologie VŠB – TU Ostrava.



Obr. 4.1 – Schéma přípravku – Simulátor přerušovaného řezu

Výhodou tohoto přípravku je snadná výměna obráběných lišt. Každá lišta je v době obrábění podložena distanční podložkou. Přípravek je konstruován pro řezné rychlosti v rozsahu $(120 - 400) \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, což zachycuje oblast obrábění slinutými karbidy a řeznou keramikou.

V průběhu obrábění se řezný nástroj pohybuje v podélném směru od hrotu ke sklíčidlu obráběcího stroje. Během jedné otáčky je řezný nástroj v záběru vystaven čtyřem rázům. Na obrázku 4.2 je znázorněn čelní pohled na simulátor.



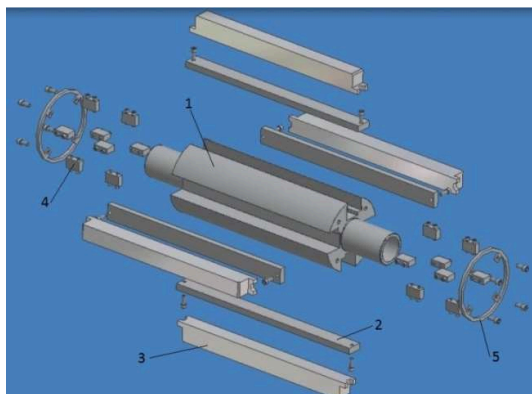
Obr. 4.2 – Čelní pohled na simulátor přerušovaného řezu [21]

3.1 Sestavení přípravku

Před začátkem experimentu bylo potřeba přípravek upnout do soustruhu pomocí jeřábu a podepřít otočným hrotem. Následně se do něj vložily lišty ze zkoušeného materiálu. K upevnění lišt se využilo klínových čelistí, které byly taženy šrouby. Přišroubované pojistné kroužky na obou čelech přípravku zamezovaly případné zranění obsluhy a pevné upnutí lišt z důvodu působení odstředivé síly v průběhu obrábění.



Obr. 4.3 – Přípravek upnutý na soustruhu



Legenda: 1 – Těleso přípravku, 2 – Vyměnitelné podložky, 3 – Obráběné lišty, 4 – Upínací klíny, 5 – Pojistné kroužky

Obr. 4.4 – Schéma demontovaného přípravku

Před samotným obráběním bylo potřeba zajistit konstantní hloubku řezu po celé délce lišt. Pro zarovnání lišt byl použit nástroj s VBD ze SK.



Obr. 4.5 – Lišty po úpravě

3.2 Obráběcí stroj

Obrábění probíhalo na soustruhu TOS Trenčín SN 55 v hale Katedry obrábění a výrobní techniky na Žilinské univerzitě v Žilině. Jedná o hrotový soustruh, který má masivní litinové lože a je ukotven v základech.

Tab. 2 – Technické parametry stroje

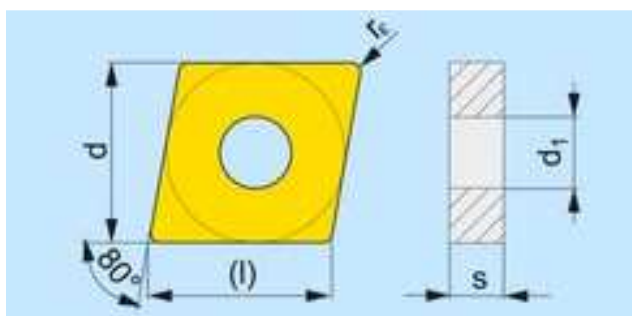
Výkon elektromotoru	8	kW
Rozsah otáček	10 – 1 000	min ⁻¹
Vzdálenost hrotů	1 500	mm
Otočný průměr	550	mm



Obr. 4.6 – Soustruh SN 55

3.3 Použitý nástroj

Pro obrábění byla zvolena VBD ze slinutého karbidu s označením CNMG 120412E – R; 6630 firmy Pramet, která během svého vývoje byla testována na katedře. Jedná se o negativní oboustrannou soustružnickou destičku s kruhovým otvorem o délce 12 mm, tloušťce 4,76 mm a se zaoblením 1,2 mm. Používá se pro obrábění oceli, austenitické a nerezové oceli, litiny a pro obrábění žárovevých slitin. Je využívána pro střední i vyšší řezné rychlosti, tak i pro kontinuální a přerušovaný řez.



Obr. 4.7 – VBD z SK [27]



Obr. 4.8 – Použitá destička z SK

3.4 Použitý držák

Destička byla upnuta do nástrojového držáku PCLNR 25 x 25 M12 čtvercového průřezu. Upnutí destičky bylo pomocí ISO P – upnutí pomocí upínky.

Tab. 3 – Geometrie nástroje [28]

Úhel nastavení hlavního ostří	K_r	95°
Úhel hlavního břitu nástroje	ψ	- 5°
Ortogonální úhel čela	γ_o	-6°
Úhel sklonu ostří	λ_s	-6°
Úhel špičky	ϵ_r	80°



Obr. 4.9 – Použitý nástroj

3.5 Materiál obráběných lišt

Pro daný experiment byly využity dva různé materiály lišt, a to ocel ISO C45 (ČSN 12 050) a ocel ISO 11CrMo9-10 (ČSN 15 128). Rozměr obráběných lišt byl (48 x 60) mm a obráběná délka byla 600 mm.

▪ Ocel ISO C45 (ČSN 12 050)

Jedná se o nelegovanou ocel vhodnou k zušlechťování. Ocel je používána pro výrobu méně namáhaných strojních dílů ve stavu zušlechtěném nebo normalizačně žíhaném. Nejvhodnějších mechanických hodnot včetně houževnatosti je dosaženo v zakaleném a následně popuštěném stavu. U tvarově složitějších dílů se pro zamezení vzniku trhlin dává přednost tepelnému zpracování

kalení do oleje. Ocel je možno použít i k povrchovému kalení plamenem nebo indukci. Je obtížně svařitelná. [25]

Tab. 4 – Značení oceli ISO C45 dle norem [25]

DIN	EN 10027 - 1	W. Nr.
C 45	C 45	1.0503

Tab. 5 – Chemické vlastnosti oceli ISO C45 [25]

C	Si _{max}	Mn	P _{max}	Cr _{max}	Mo _{max}	Ni _{max}	Cu	Cr + Mo + Ni	S
0,460	0,400	0,600	0,030	0,400	0,100	0,300	max. 0,300	max. 0,630	max. 0,040

Tab. 6 – Mechanické vlastnosti oceli ISO C45 [25]

Rp _{0,2} [MPa]	Rm [MPa]	A5 [%]	Tvrdost HB	E [GPa]
340	620	17	max. 225	211

▪ Ocel ISO 11CrMo9-10 (ČSN 15 128)

Jedná se o žárovečnou ocel pro energetická a chemická zařízení s provozním médiem do 580° C. Ocel odolává účinkům vodní páry a vodíku. Svařitelnost u této oceli je zaručená.

Tab. 7 – Značení oceli ISO 11CrMo9-10 dle norem [26]

EN 10027 - 1	EN 10027 - 2
11CrMo9-10	1.7715

Tab. 8 – Chemické složení oceli ISO 11CrMo9-10 [26]

C	Mn	Si	Cr	Mo	V	P	S
0,14	0,60	0,35	0,65	0,50	0,30	max. 0,04	max. 0,04

Tab. 9 – Mechanické vlastnosti oceli ISO 11CrMo9-10 [26]

Rp _{0,2} [MPa]	Rm [MPa]	A5 [%]	Tvrdost HB	E [GPa]
294	470 - 640	17	135 – 183	214



Obr. 4.10 – Materiál před obráběním

3.6 Postup experimentu

Po úpravě lišt byly na stroji nastaveny parametry obrábění. Řezná rychlost v_c a hloubka řezu a_p zůstaly konstantní. Ke změně docházelo pouze při volbě posuvu f na hodnoty (0,11; 0,2; 0,32) mm.

Lišty upnuté v přípravku byly podélně soustruženy řezným nástrojem ve třech úsecích v délce $L = 25$ mm při řezných parametrech $v_c = 204 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $n = 250 \text{ min}^{-1}$, $a_p = 1 \text{ mm}$ a $f = (0,11; 0,2; 0,32) \text{ mm}$. Tento test představoval pravidelný přerušovaný řez. Po obrobení lišt s posuvem $f = 0,32 \text{ mm}$ byla z přípravku vytažena vždy jedna lišta.



Obr. 4.11 – Lišta po obrobení

Vyjmutí první lišty z přípravku představovalo nepravidelný přerušovaný řez. Test se opakoval za daných podmínek, dokud nebyla z přípravku vytažena i poslední lišta. Demontáž lišt byla ve směru otáčení sklíčidla. Z důvodu nevyváženosti přípravku docházelo v průběhu testu k obvodovému házení. Následně se celý experiment zopakoval s materiálem ISO 11CrMo9-10.

Na obrázku 4.12 jsou vyobrazeny lišty obou materiálů po ukončení obrábění v pořadí, jak byly postupně vyjmuty z přípravku.



Obr. 4.12 – Obrobené lišty a) Ocel ISO C45, b) Ocel ISO 11CrMo9-10

3.6.1 Plán experimentu

Níže uvedené tabulky popisují průběh experimentu obrábění.

Tab. 10 – Schéma experimentu

n = 1	n = 2	n = 3
L = 25 mm	L = 25 mm	L = 25 mm
4 lišty	4 lišty	4 lišty
$v_c = 204 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ $n = 250 \text{ min}^{-1}$ $a_p = 1 \text{ mm}$ $f = 0,11 \text{ mm}$	$v_c = 204 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ $n = 250 \text{ min}^{-1}$ $a_p = 1 \text{ mm}$ $f = 0,20 \text{ mm}$	$v_c = 204 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ $n = 250 \text{ min}^{-1}$ $a_p = 1 \text{ mm}$ $f = 0,32 \text{ mm}$
n = 4	n = 5	n = 6
L = 25 mm	L = 25 mm	L = 25 mm
3 lišty	3 lišty	3 lišty
$v_c = 204 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ $n = 250 \text{ min}^{-1}$ $a_p = 1 \text{ mm}$ $f = 0,11 \text{ mm}$	$v_c = 204 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ $n = 250 \text{ min}^{-1}$ $a_p = 1 \text{ mm}$ $f = 0,20 \text{ mm}$	$v_c = 204 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ $n = 250 \text{ min}^{-1}$ $a_p = 1 \text{ mm}$ $f = 0,32 \text{ mm}$
n = 7	n = 8	n = 9
L = 25 mm	L = 25 mm	L = 25 mm
2 lišty	2 lišty	2 lišty
$v_c = 204 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ $n = 250 \text{ min}^{-1}$ $a_p = 1 \text{ mm}$ $f = 0,11 \text{ mm}$	$v_c = 204 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ $n = 250 \text{ min}^{-1}$ $a_p = 1 \text{ mm}$ $f = 0,20 \text{ mm}$	$v_c = 204 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ $n = 250 \text{ min}^{-1}$ $a_p = 1 \text{ mm}$ $f = 0,32 \text{ mm}$
n = 10	n = 11	n = 12
L = 25 mm	L = 25 mm	L = 25 mm
1 lišta	1 lišta	1 lišta
$v_c = 204 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ $n = 250 \text{ min}^{-1}$ $a_p = 1 \text{ mm}$ $f = 0,11 \text{ mm}$	$v_c = 204 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ $n = 250 \text{ min}^{-1}$ $a_p = 1 \text{ mm}$ $f = 0,20 \text{ mm}$	$v_c = 204 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ $n = 250 \text{ min}^{-1}$ $a_p = 1 \text{ mm}$ $f = 0,32 \text{ mm}$
Řezný nástroj VBD z SK (6630)		
Ocel ISO C45		
Ocel ISO 11CrMo9-10		

Legenda:

n – označení obráběné plochy [-]

L – délka obráběné plochy [mm]

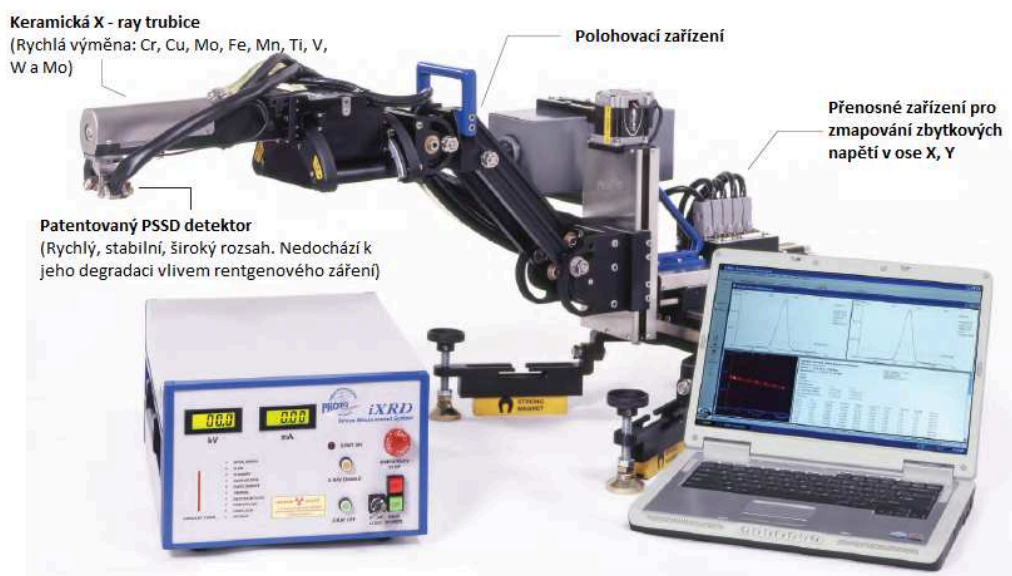
3.7 Měření zbytkových napětí

3.7.1 Měřicí zařízení Proto iXRD

Zbytková napětí v lištách byla změřena pomocí přístroje Proto iXRD. Jde o přenosné zařízení pracující na principu rentgenové difrakce. Jedná se o jednu z nejvhodnějších metod v oblasti obrábění.

Přístroj umožňuje měřit zbytková napětí ve všech krystalických materiálech a díky své konstrukci je ho možno využít v laboratorních podmínkách, tak i ve výrobním procesu. Variabilnost detekční hlavy a různě tvarovaný kolimátor umožňuje měřit napětí od velmi malých součástek, jako jsou dentální implantáty, až po velkorozměrné součástky (potrubí plynovodu). Součástí vybavení přístroje je také polohovatelný stůl s posuvem ve dvou osách (X, Y) a otáčením ve třetí ose.

Výhodou této metody je vyhodnocení zbytkových napětí v absolutních fyzikálních jednotkách MPa a poměrně časová nenáročnost metody.



Obr. 4.13 – Zařízení Proto iXRD [29]

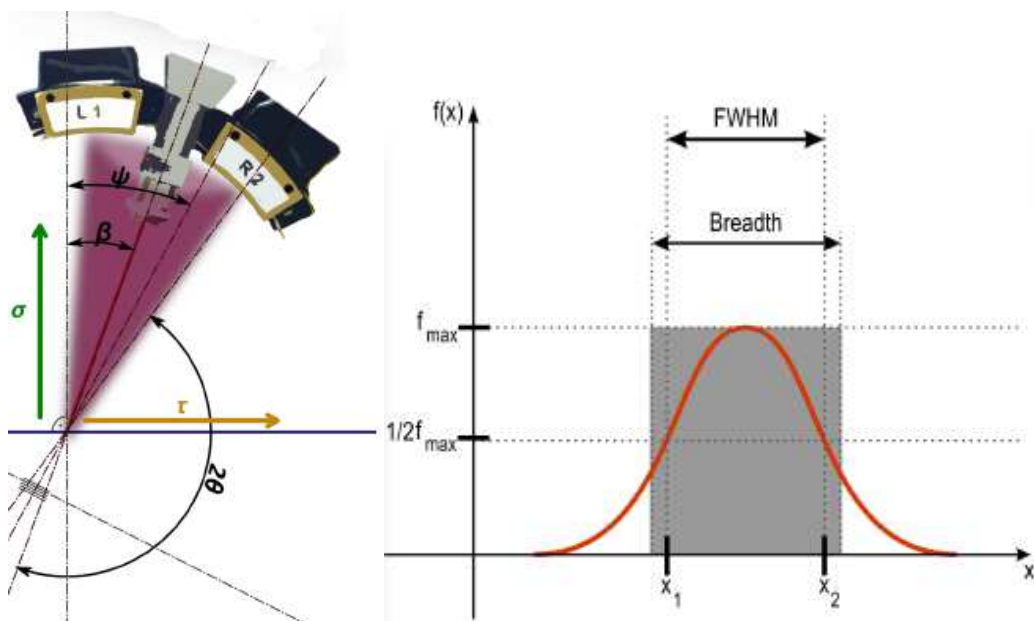
3.7.2 Postup měření

Před samotným měřením bylo potřeba vyčkat na nastavení parametrů přístroje, jako je napětí 40 kV a proud 4 mA. Pro náš případ byla použita chromová trubice, která byla zvolena na základě materiálu, který byl měřen.

Dále měření probíhalo v následujících krocích:

- Vzorek byl umístěn pod měřicí hlavu tak, aby kolimátor směřoval kolmo na povrch vzorku.
- Nastavení výšky měřicí hlavy, kdy rentgenový paprsek je soustředěný do povrchových vrstev a proniká přibližně do hloubky $12\text{ }\mu\text{m}$. Následně v závislosti od charakteru zbytkových napětí difraktuje v podobě difrakčního kuželu, který je zachycen detektory. Rentgenový paprsek je vysílán při několika náklonech měřicí hlavy v rozstupech od $+30^\circ$ do -30° . Popis je znázorněno na obr. 4.14.
- Softwarem XrdWin dojde k zaznamenání signálů, které byly zachyceny detektory, a zpracování na křivky Gaussova rozdělení.

Celkové naměřené zbytkové napětí je integrální hodnota zaznamenaná z více náklonů měřicí hlavy a ve vyhodnocení je pod názvem *Stress*. Smykové / tangenciální napětí je označeno jako *ShearStress*. Obě napětí jsou v jednotkách mega pascal [MPa].



Obr. 4.14 – Znázornění difrakčního kužele a výstupní křivky

▪ **Vysvětlení pojmů ve výstupním protokolu**

- **Stress – napětí σ [MPa]** – normálové napětí vzhledem k povrchu vzorku
- **Shearstress – smykové napětí τ [MPa]**
- **Úhel Beta β [°]** – úhel naklonění rentgenového paprsku od normály povrchu zkoumaného vzorku. (Proto iXRD interval měření od + 30° do – 30°, počet měření lze nastavit dle požadované přesnosti)
- **Úhel Psi ψ [°]** - definuje orientaci povrchu zkoumaného materiálu – úhel mezi normálou povrchu a osou úhlu mezi dopadajícím a odraženým paprskem. $\sin^2\psi$ – $\sin^2\psi$ [-] – vyjadřuje hodnotu funkce pro daný úhel ψ .
- **Dspacing – d [nm]** – vzdálenost mezi dvěma krystalografickými rovinami – v závislosti na směru a velikosti napětí se hodnota mění.
- **2Theta – úhel 2θ [°]** – difrakční úhel, který je definovaný jako úhel mezi dopadajícím a difraktovaným paprskem
- **Strain*E3 – $\epsilon \cdot 10^3$ ($\epsilon \cdot 10^3 = \frac{d_1 - d_0}{d_0} \cdot 10^3$) [-]** – poměrné prodloužení v měřítku 1 000:1.
- **FWHM – Full Width at Half Maximum** – celá šířka při polovičním maximu [°] – šířka Gaussova rozdělení v polovině výšky celkového vrcholu rozdělení. (Určuje strukturu materiálu: Čím je materiál zrnitější, tím je širší rozdělení“.
- **Breadth – integral breadth – integrální šířka [°]** – šířka pravoúhelníku se stejnou výškou a obsahem plochy jako je výška křivky a obsah plochy pod křivkou Gaussova rozdělení.
- **Intensity – intenzita** – intenzita signálu detektoru L1 a R2 [n] – množství na ose X vyjadřuje intenzitu z jednotlivých kanálů.

3.8 Výsledky měření a vyhodnocení zbytkových napětí

Zbytková napětí byla změřena pomocí přístroje Proto iXRD, který využívá rentgenové difrakce. Pro různé parametry byly vždy změřeny dva body, jak je znázorněno na obrázku 4.15. Bod, kdy řezný nástroj vstupoval do záběru s materiálem (dále označeno jako vstup) a bod, kdy docházelo k výstupu nástroje z něj (označeno jako výstup).



Obr. 4.15 – Rozložení bodů pro měření

3.8.1 Materiál ISO C45 (ČSN 12 050)

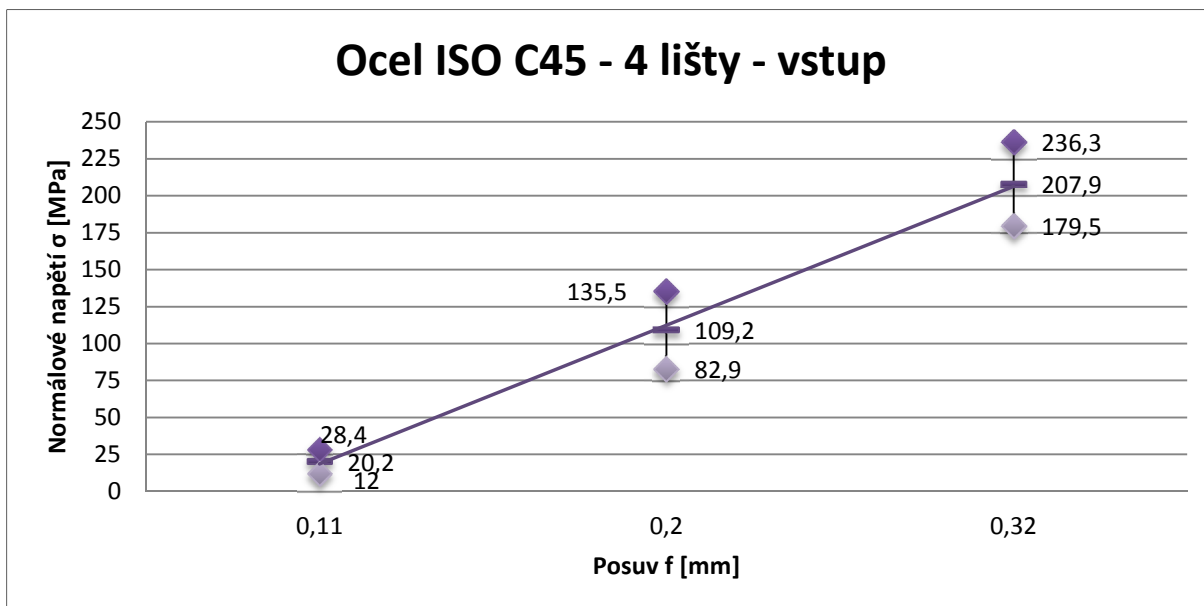
V tabulce č. 11 jsou uvedeny vstupní a výstupní hodnoty normálového napětí v jednotkách [MPa]. Data jsou rozdělena podle počtu upnutých lišt a hodnoty posuvu.

Tab. 11 – Naměřené hodnoty normálového napětí oceli ISO C45

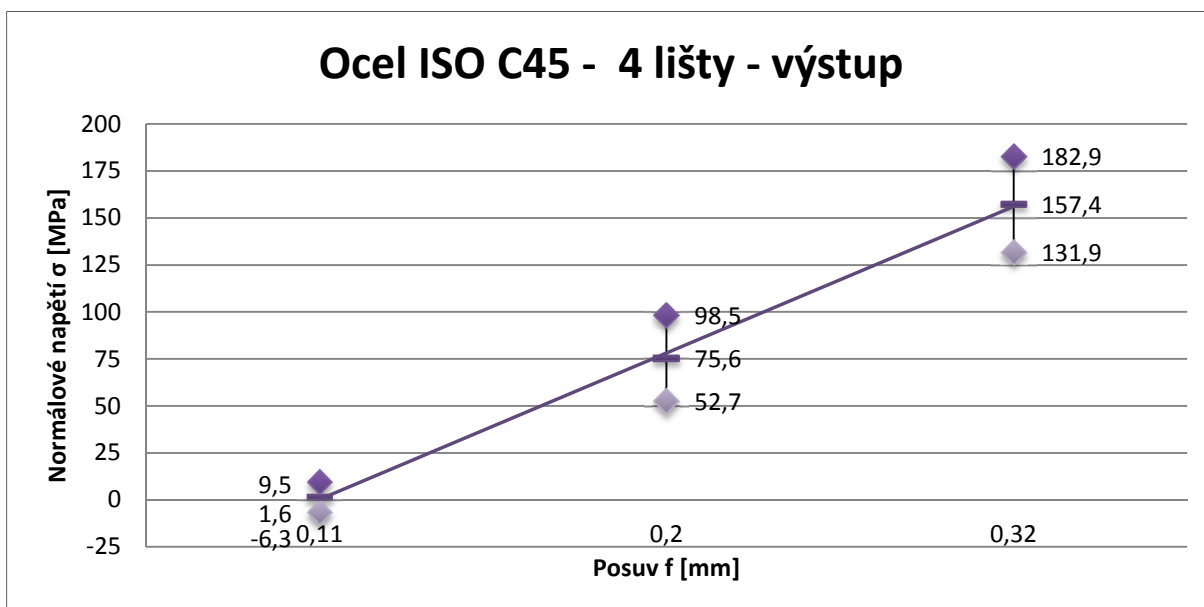
Ocel ISO C45 (ČSN 12 050)			
Počet lišt v záběru		Vstupní hodnota	Výstupní hodnota
4 lišty	Posuv f [mm]	Normálové napětí σ [MPa]	Normálové napětí σ [MPa]
	0,11	20,2±8,2	1,6±7,9
	0,2	109,2±26,3	75,6±22,9
	0,32	207,9±28,4	157,4±25,5
3 lišty	Posuv f [mm]		
	0,11	70,9±22,7	52,1±21,9
	0,2	120,9±12,4	99,4±11,8
	0,32	136,1±17,1	111,3±17,9
2 lišty	Posuv f [mm]		
	0,11	56,2±17,0	26,7±16,2
	0,2	164,3±22,6	149,4±21,9
	0,32	199,0±21,0	210,4±22,1
1 lišta	Posuv f [mm]		
	0,11	-116,2±12,9	-89,4±11,0
	0,2	52,0±14,6	31,9±13,9
	0,32	138,0±23,3	113,2±22,8

Z výše uvedené tabulky jsou data zpracována do přehledných grafů v závislosti normálového napětí na posuvu nebo počtu upnutých lišt.

▪ 4 lišty



Obr. 4.16 – Závislost normálového napětí σ na posuvu f při 4 lištách na vstupu u oceli ISO C45

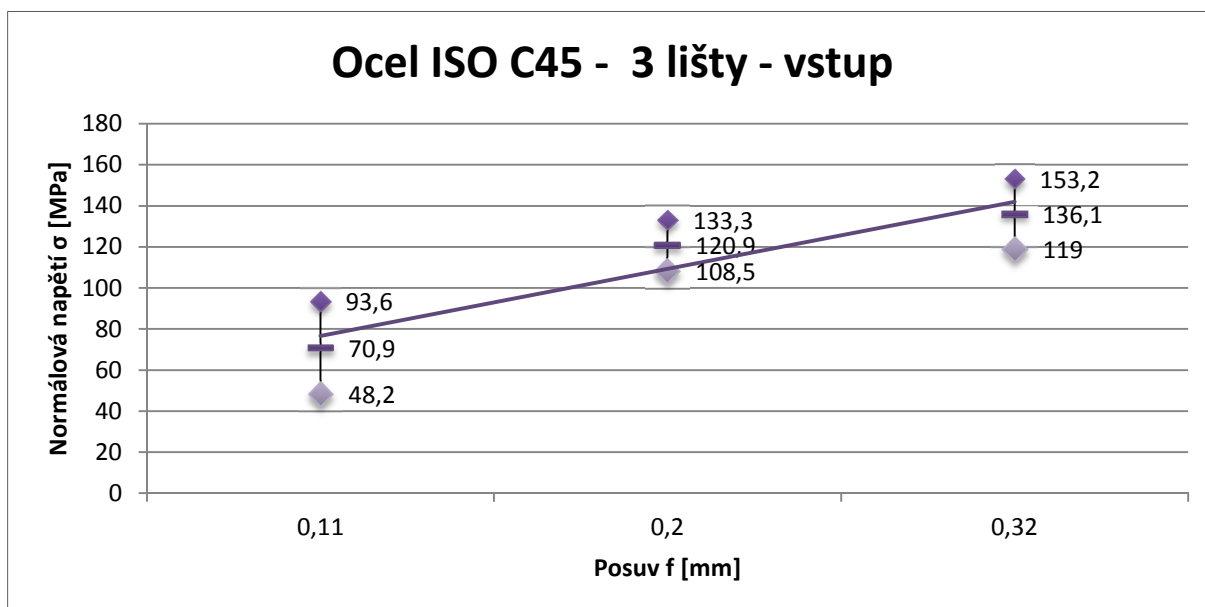


Obr. 4.17 – Závislost normálového napětí σ na posuvu f při 4 lištách na výstupu u oceli ISO C45

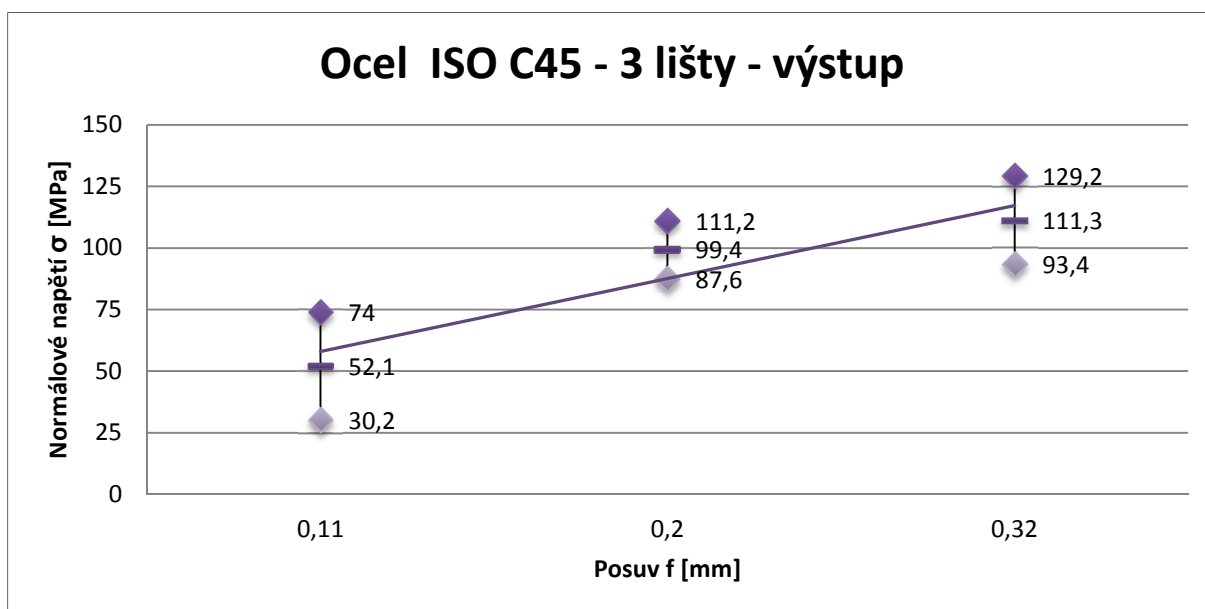
Grafické znázornění, viz. obrázek 4.16, popisuje průběh napětí při různých hodnotách posuvu s upnutím 4 lišt v přípravku. Se zvyšující hodnotou zbytková napětí na vstupu rostou. Vysoký vzestup můžeme sledovat při posuvu 0,2 mm. Totéž

můžeme říci o obrázku 4.17, kde jsou zobrazeny hodnoty na výstupu za stejných podmínek. Zde hodnoty napětí mírně zasahují i do oblasti napětí tahových.

- 3 lišty



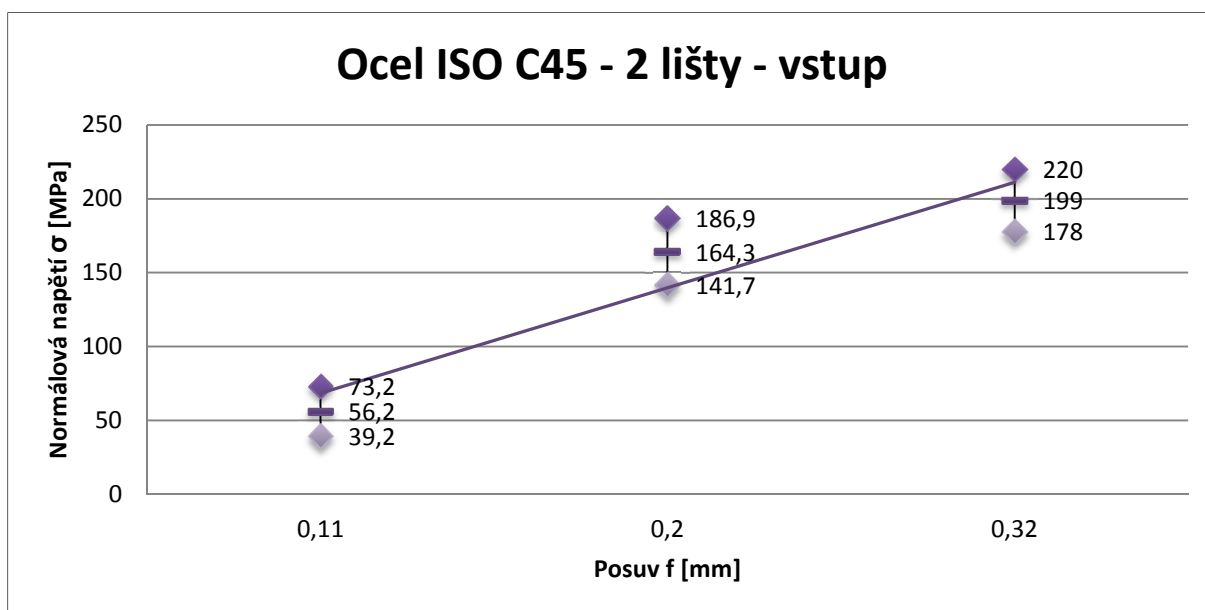
Obr. 4.18 – Závislost normálového napětí σ na posuvu f při 3 lištách na vstupu u oceli ISO C45



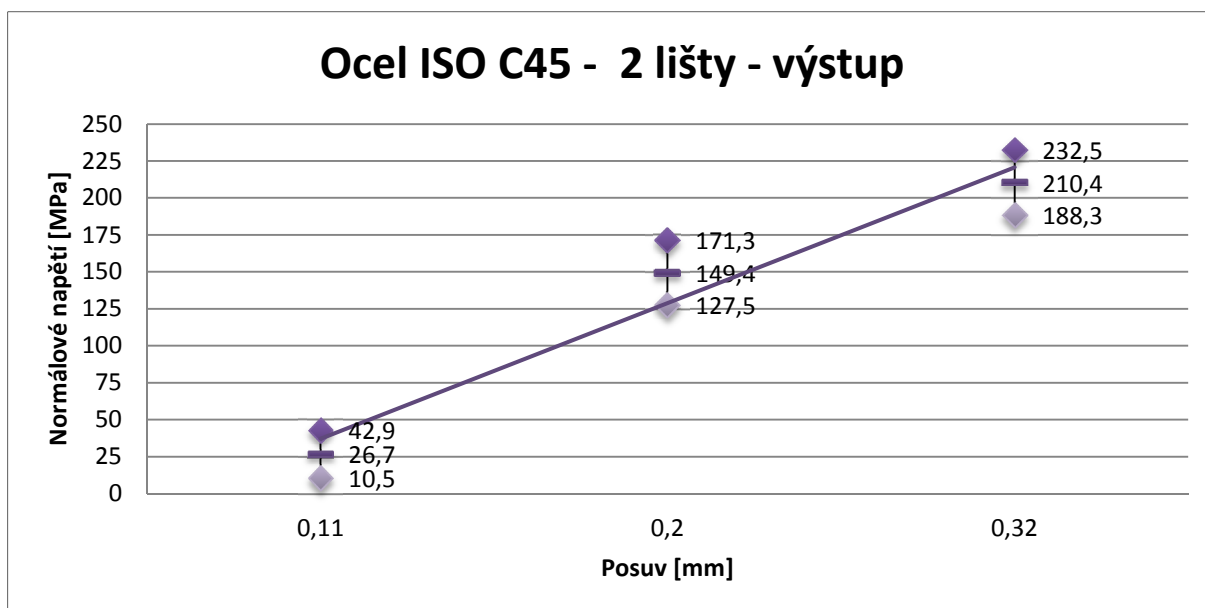
Obr. 4.19 – Závislost normálového napětí σ na posuvu f při 3 lištách na výstupu u oceli ISO C45

Naměřené hodnoty normálových napětí, kdy byly v přípravku upnuty tři lišty, mají opět rostoucí průběh. Oproti obrábění se 4 lištami se napětí při posuvu 0,11 mm zvýšila o trojnásobek své předchozí hodnoty.

- 2 lišty



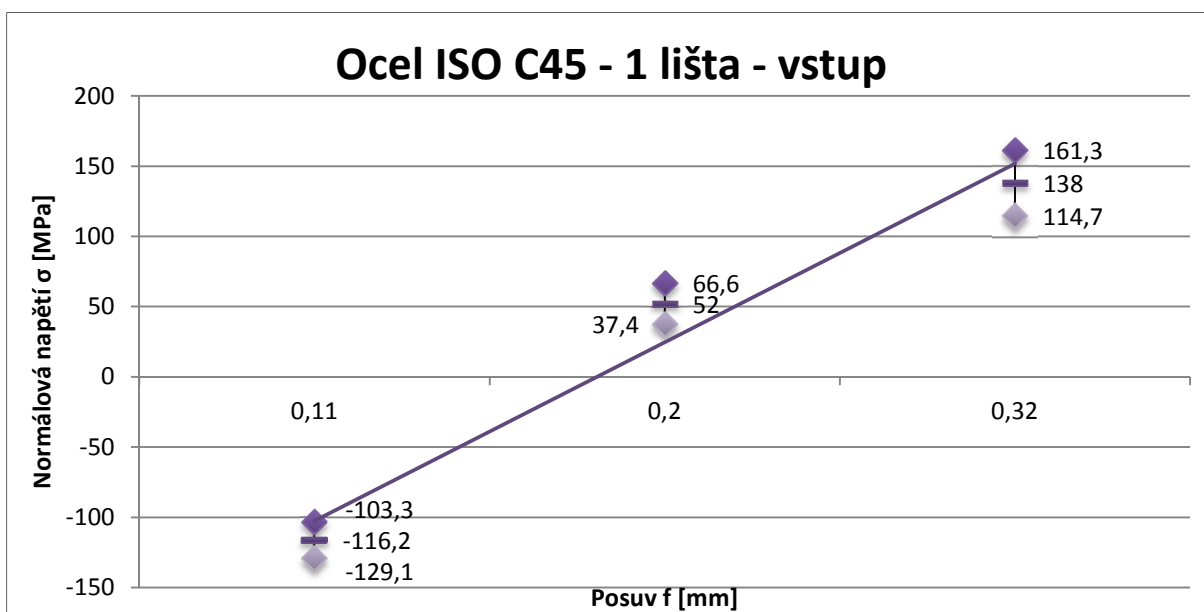
Obr. 4.20 – Závislost normálového napětí σ na posuvu f při 2 lištách na vstupu u oceli ISO C45



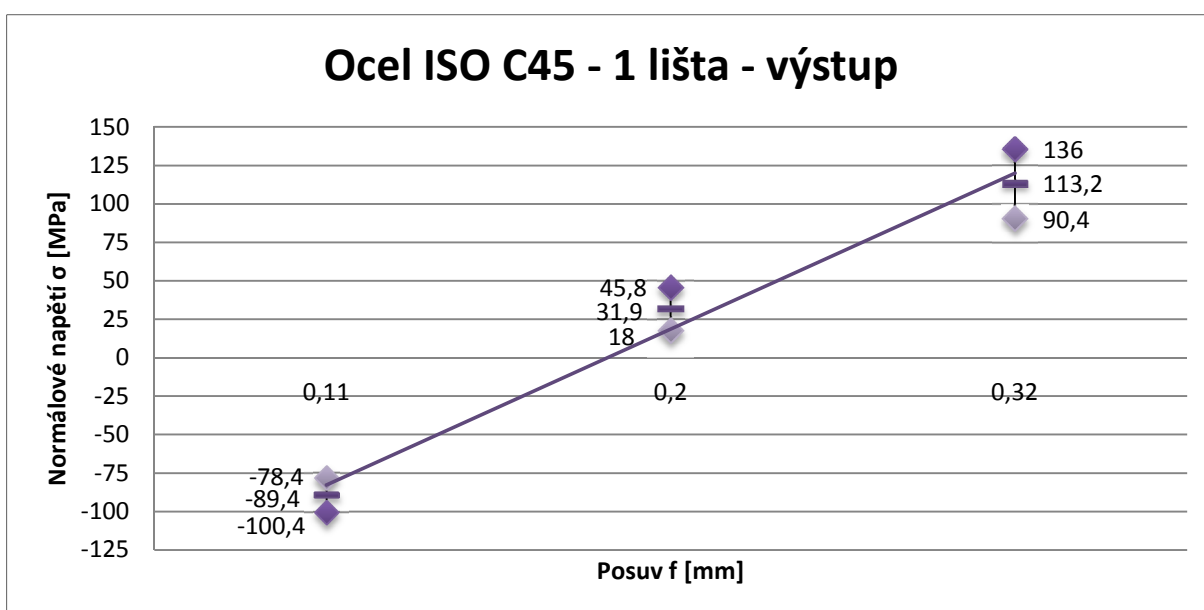
Obr. 4.20 – Závislost normálového napětí σ na posuvu f při 2 lištách na výstupu u oceli ISO C45

Obrázky 4.20 a 4.21 graficky popisují normálová napětí na vstupu a výstupu při dvou upnutých lištách. Při silně nepravidelném přerušovaném řezu mají napětí stále rostoucí průběh, ovšem velikosti normálových napětí dosahují vyšších hodnot než v předešlých dvou situacích.

- 1 lišta



Obr. 4.22 – Závislost normálového napětí σ na posuvu f při 1 liště na vstupu u oceli ISO C45

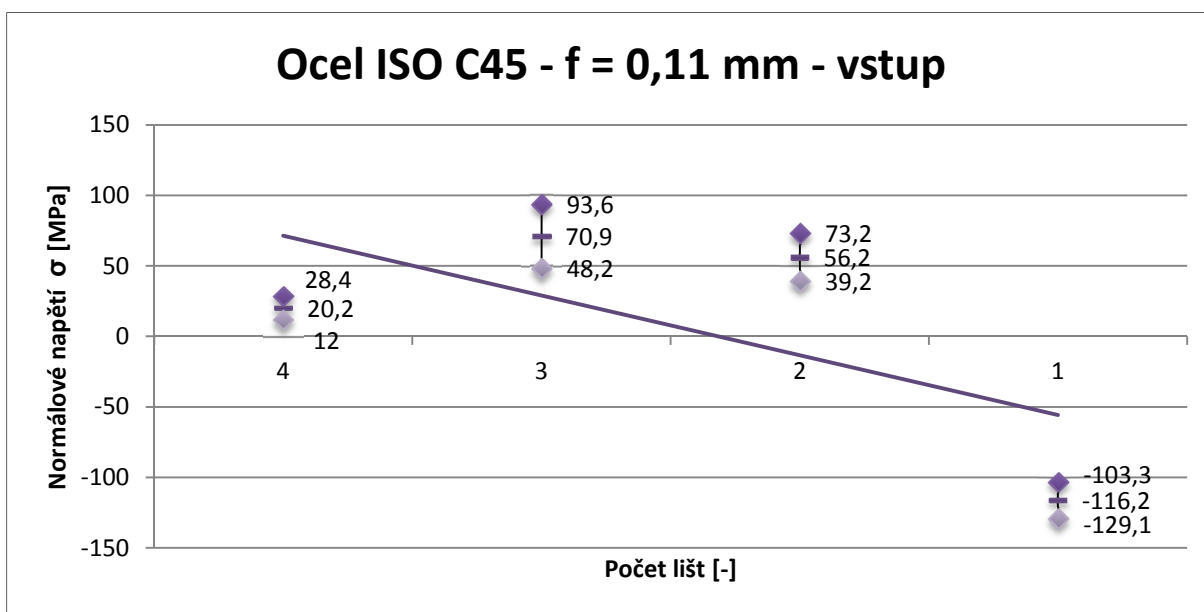


Obr. 4.23 – Závislost normálového napětí σ na posuvu f při 1 liště na výstupu u oceli ISO C45

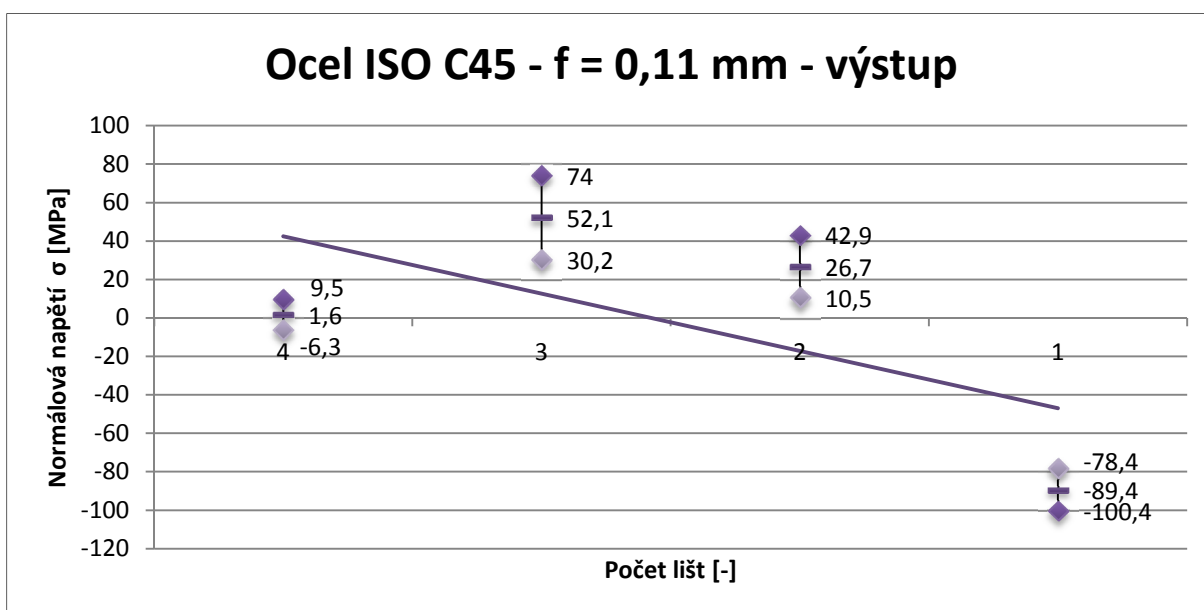
Obrábění s jednou upnutou lištou v přípravku znázorňují obrázky 4.22 a 4.23. Zde můžeme pozorovat přechod do oblasti tahových napětí při soustružení s posuvem 0,11 mm. Hodnoty dosahují opět velikosti „stovek“ [MPa], ale nejsou tak velká, jako v předchozí situaci.

Níže uvedené grafy porovnávají závislost velikosti normálového napětí na počtu upnutých lišt při stejném posuvu. Opět pro vstup a výstup.

- $f = 0,11 \text{ mm}$



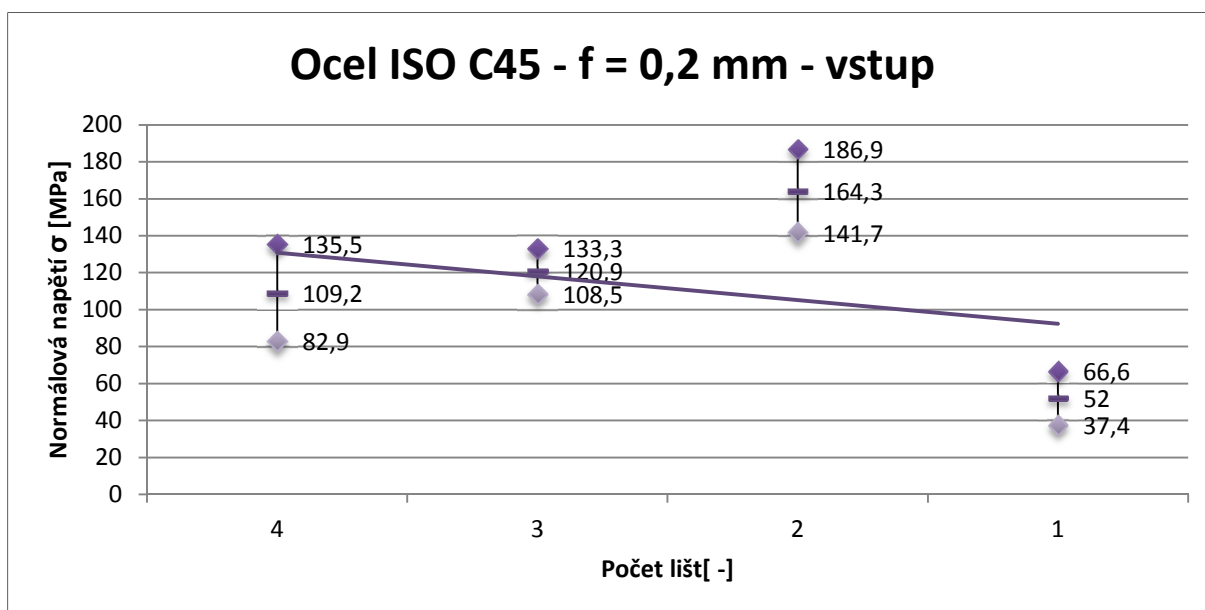
Obr. 4.24 – Závislost normálového napětí σ na počtu lišt při posuvu $0,11 \text{ mm}$ na vstupu u oceli ISO C45



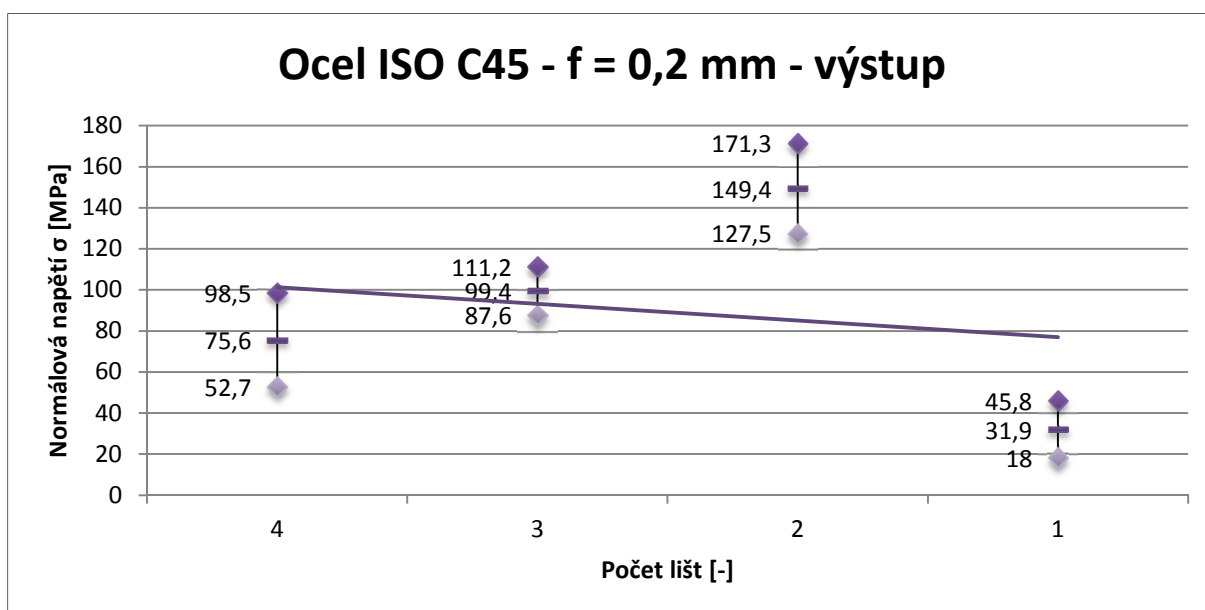
Obr. 4.25 – Závislost normálového napětí σ na počtu lišt při posuvu $0,11 \text{ mm}$ na výstupu u oceli ISO C45

Se zvyšující nevyvážeností přípravku mají napětí jak pro vstupní body, tak i pro výstupní body podobný průběh. Po odebrání jedné lišty z přípravku dojde k lehkému růstu, následně pak napětí mají tendenci klesat. Při jedné liště se napětí dostávají do oblasti vysokých hodnot v tahu.

- $f = 0,2 \text{ mm}$



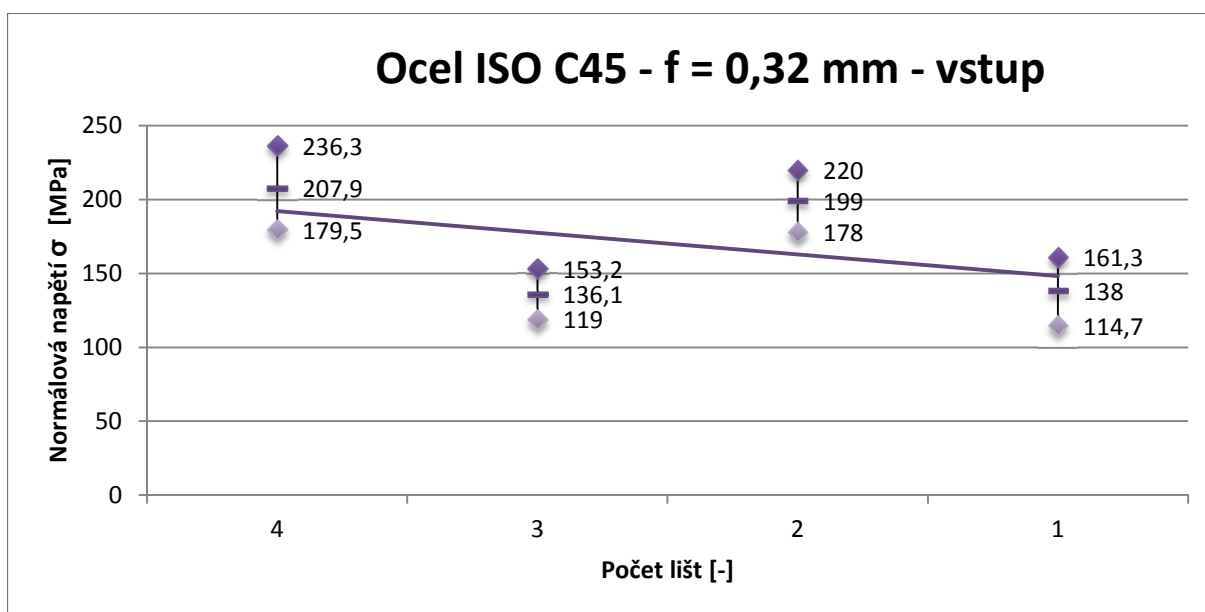
Obr. 4.26 – Závislost normálového napětí σ na počtu lišt při posuvu $0,2 \text{ mm}$ na vstupu u oceli ISO C45



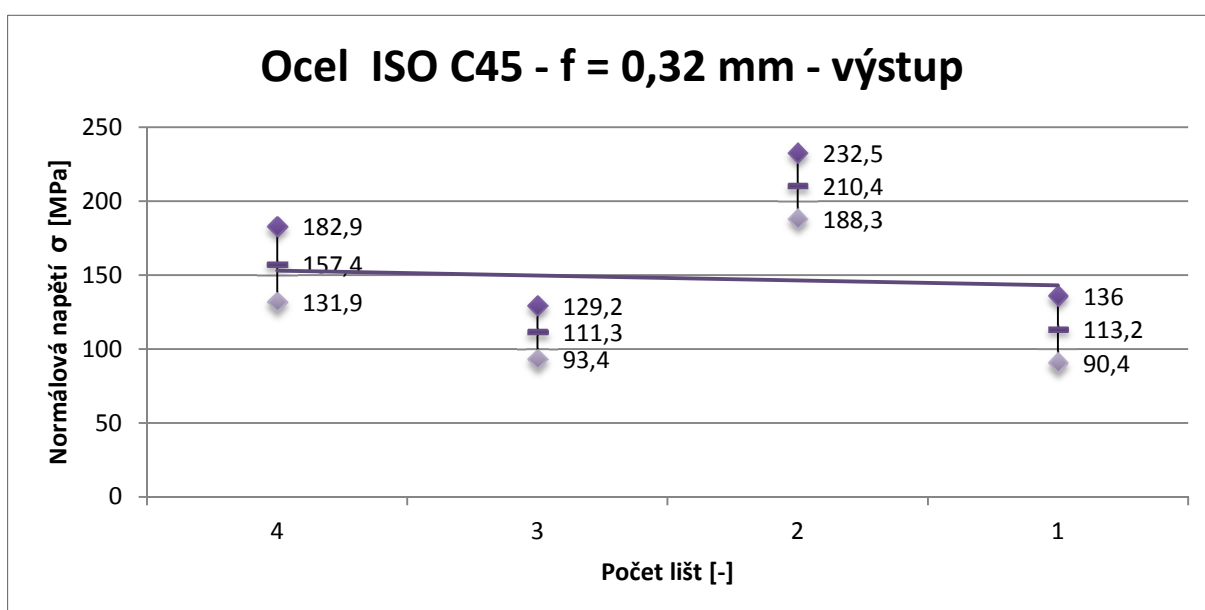
Obr. 4.27 – Závislost normálového napětí σ na počtu lišt při posuvu $0,2 \text{ mm}$ na výstupu u oceli ISO C45

Z grafického znázornění, viz obrázky 4.26 a 4.27, můžeme pozorovat plynulý pokles velikosti normálového napětí. Změna však nastává při posuvu $0,2 \text{ mm}$, kdy hodnoty prudce stoupnou. V porovnání s grafy 4.24 a 4.25, které popisují velikosti napětí pro posuv $0,11 \text{ mm}$, se všechny hodnoty pohybují v oblasti tlakových napětí.

- $f = 0,32 \text{ mm}$



Obr. 4.28 – Závislost normálového napětí σ na počtu lišt při posuvu $0,32 \text{ mm}$ na vstupu u oceli ISO C45



Obr. 4.29 – Závislost normálového napětí σ na počtu lišt při posuvu $0,32 \text{ mm}$ na výstupu u oceli ISO C45

Obrábění při posuvu $0,32 \text{ mm}$, jak popisuje obrázek 4.28 a 4.29, jsou hodnoty napětí ve stovkách [MPa]. Velikosti napětí mají střídavý charakter. U soustružení se dvěma upnutými lištami byly hodnoty na výstupu vyšší než hodnoty na vstupu. Na vstupu maximální hodnota dosahovala 220 MPa a na výstupu $252,5 \text{ MPa}$.

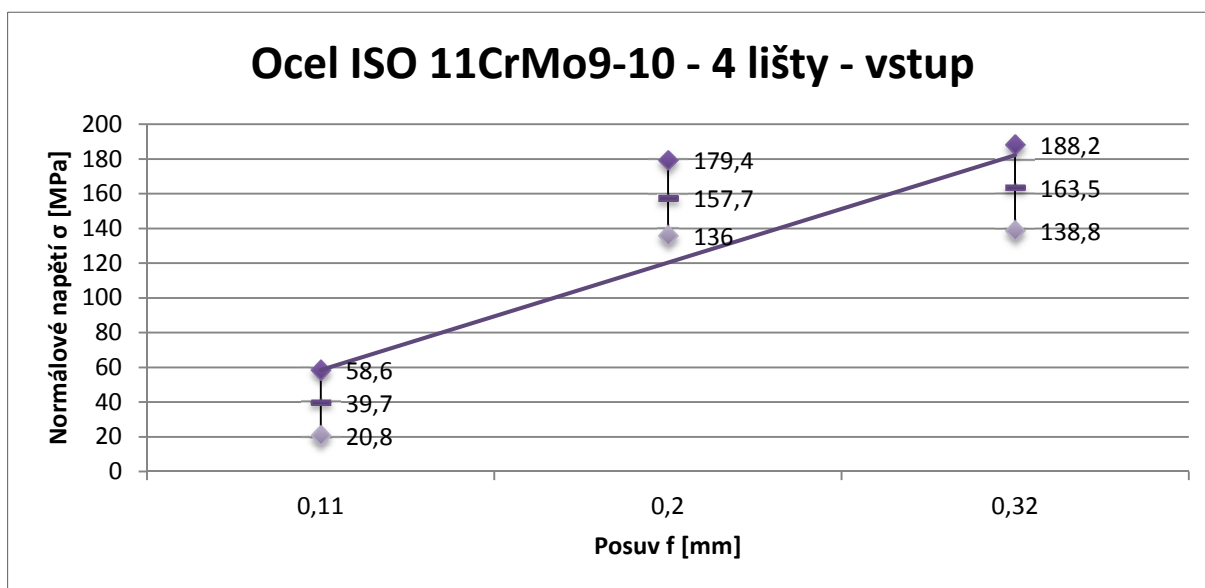
3.8.2 Materiál ISO 11CrMo9-10 (ČSN 15 128)

Měření zbytkových napětí probíhalo i na materiálu ISO 11CrMo-10. Opět byly změřeny dva body – vstup a výstup. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce č.12 a následně přeneseny do grafů, které představují závislost normálového napětí na velikosti posuvu, popřípadě počtu upnutých lišt v přípravku.

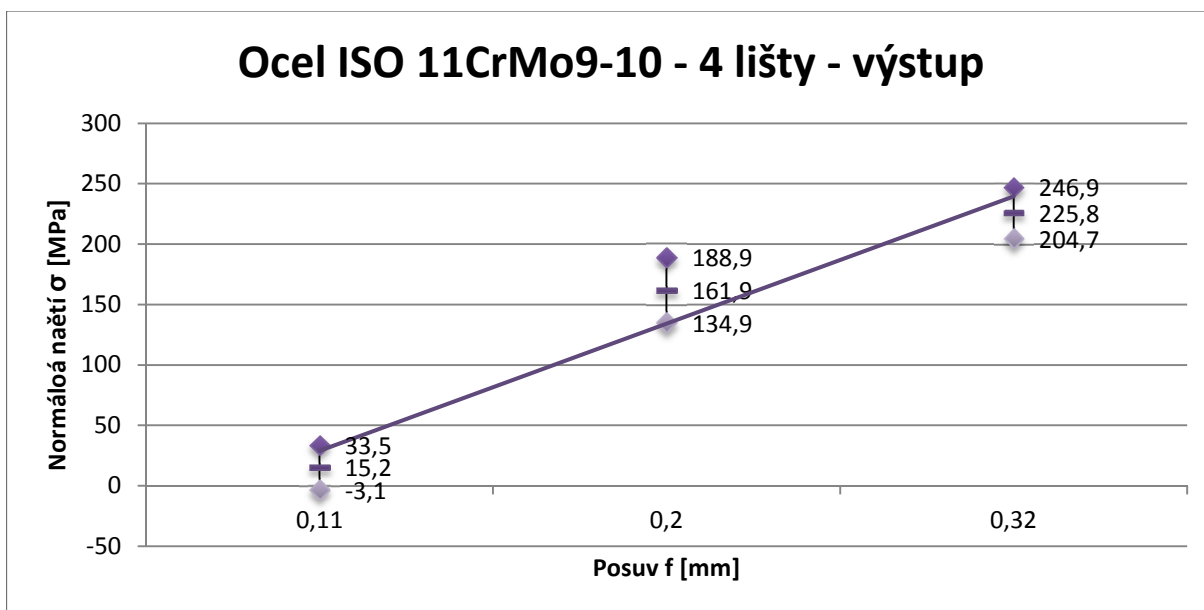
Tab. 12 – Naměřené hodnoty normálového napětí oceli ISO 11CrMo9-10

Ocel ISO 11CrMo9-10 (ČSN 15 128)			
Počet lišt v záběru		Vstupní hodnota	Výstupní hodnota
4 lišty	Posuv f [mm]	Normálové napětí σ [MPa]	Normálové napětí σ [MPa]
	0,11	39,7±18,9	15,2±18,3
	0,2	157,7±21,7	161,9±27,0
	0,32	163,5±24,7	225,8±21,1
3 lišty	Posuv f [mm]		
	0,11	142,7±17,4	130,6±25,4
	0,2	90,3±22,7	105,6±27,2
	0,32	233,2±28,2	305,6±25,5
2 lišty	Posuv f [mm]		
	0,11	-89,4±24,5	-79,3±20,6
	0,2	24,2±21,0	38,1±25,4
	0,32	175,2±24,5	255,4±23,9
1 lišta	Posuv f [mm]		
	0,11	54,8±17,5	41,1±20,3
	0,2	90,5±34,4	102,9±31,9
	0,32	63,7±19,3	142,9±21,7

▪ 4 lišty



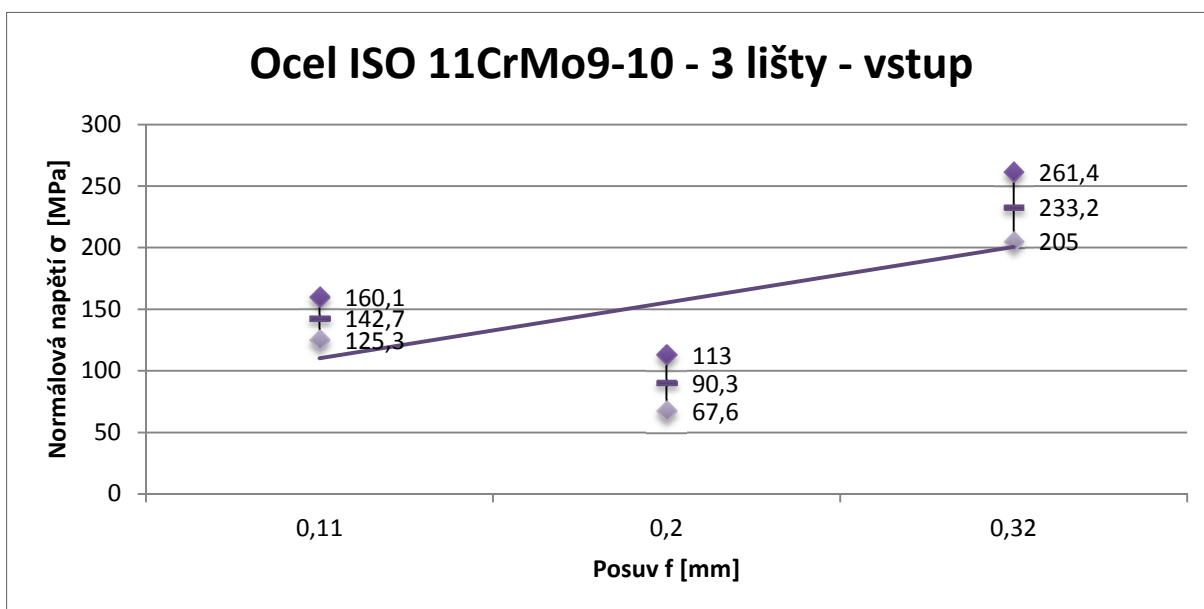
Obr. 4.30 – Závislost normálového napětí σ na posuvu f při 4 lištách na výstupu u oceli ISO 11CrMo9-10



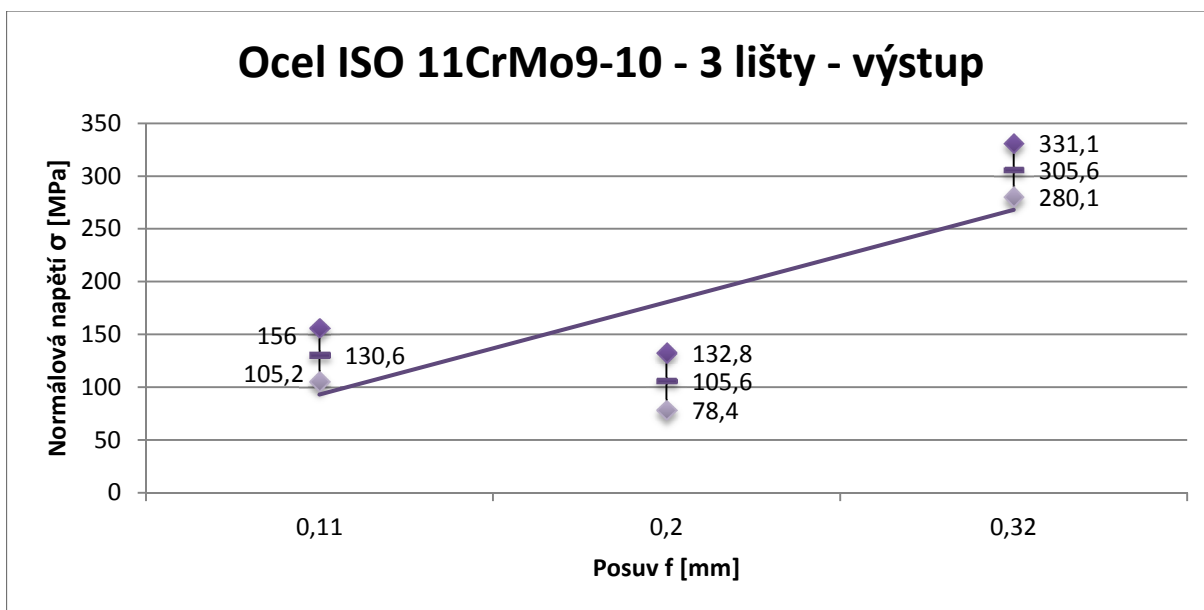
Obr. 4.31 – Závislost normálového napětí σ na posuvu f při 4 lištách na výstupu u oceli ISO 11CrMo9-10

Hodnoty zbytkových napětí u oceli ISO 11CrMo9-10 jak na vstupu, tak i na výstupu měly rostoucí průběh. Výstupní hodnoty u posuvu 0,11 mm se blížily nule. Při posuvu 0,32 mm hodnota přesahovala 200 MPa.

▪ 3 lišty



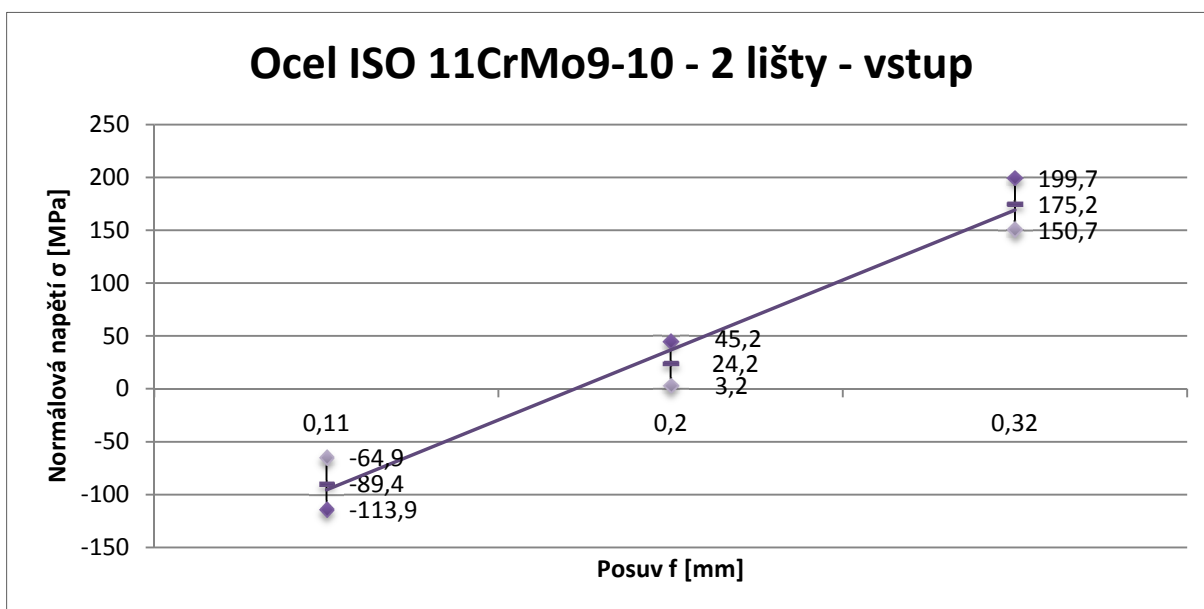
Obr. 4.32 – Závislost normálového napětí σ na posuvu f při 3 lištách na vstupu u oceli ISO 11CrMo9-10



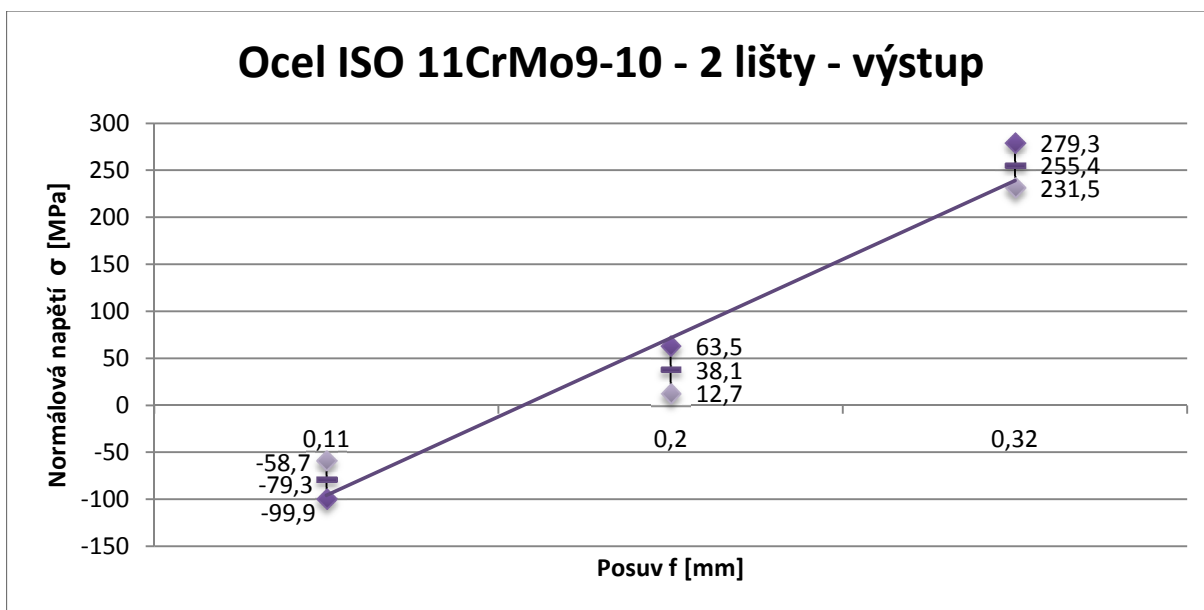
Obr. 4.33 – Závislost normálového napětí σ na posuvu f při 3 lištách na výstupu u oceli ISO 11CrMo9-10

Při odebrání jedné lišty z přípravku graf nemá rostoucí průběh, jak znázorňuje obrázek 4.32 a 4.33. U posuvu 0,11 mm se napětí výrazně zvýšila v porovnání s předchozími grafy 4.30 a 4.31.

▪ 2 lišty



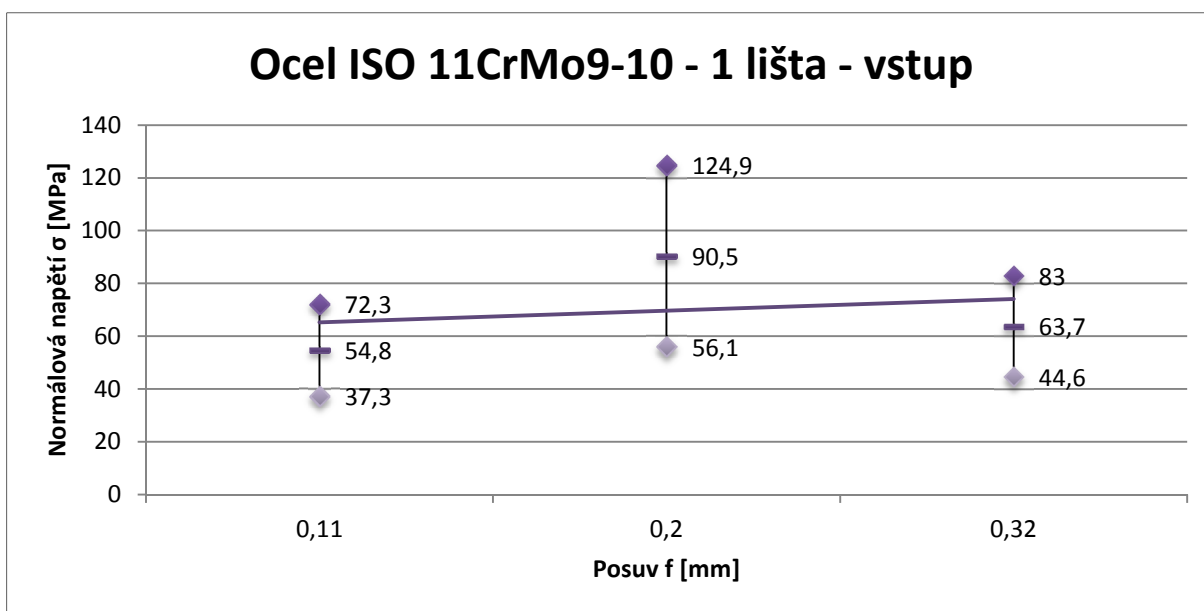
Obr. 4.34 – Závislost normálového napětí σ na posuvu f při 2 lištách na vstupu u oceli ISO 11CrMo9-10



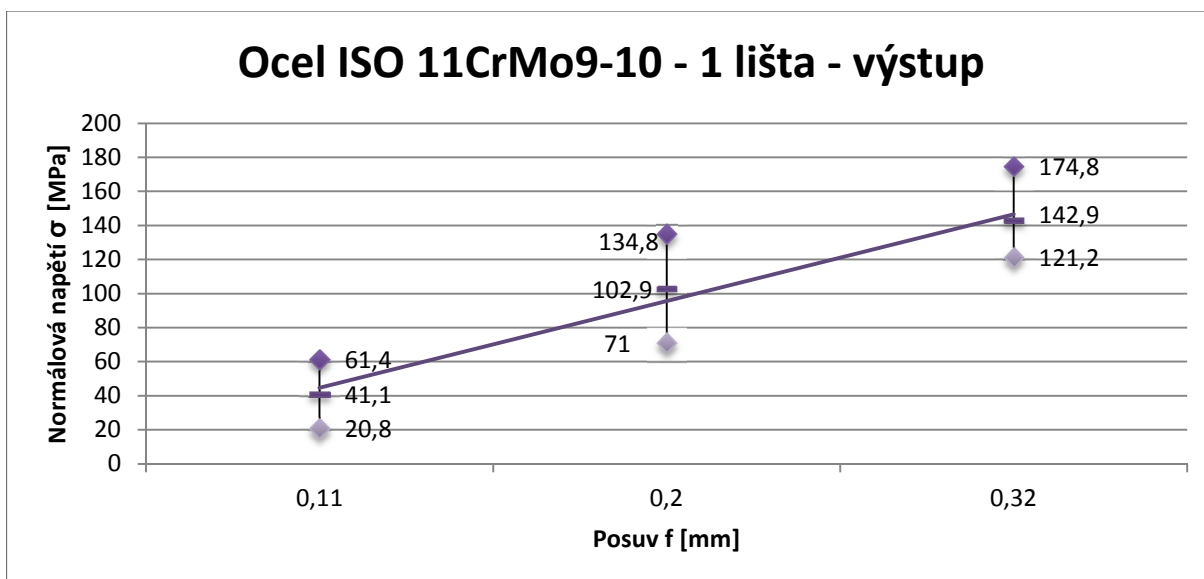
Obr. 4.35 – Závislost normálového napětí σ na posuvu f při 2 lištách na výstupu u oceli ISO 11CrMo9-10

Získané hodnoty zbytkového napětí při 2 upnutých lištách mají rostoucí průběh. Při posuvu 0,11 mm jak na vstupu, tak na výstup se hodnoty pohybují v oblasti tahových napětí. Výstupní hodnota u posuvu 0,32 mm nabývá vyšší hodnoty, než na vstupu.

▪ 1 lišta



Obr. 4.36 – Závislost normálového napětí σ na posuvu f při 1 liště na vstupu u oceli ISO 11CrMo9-10

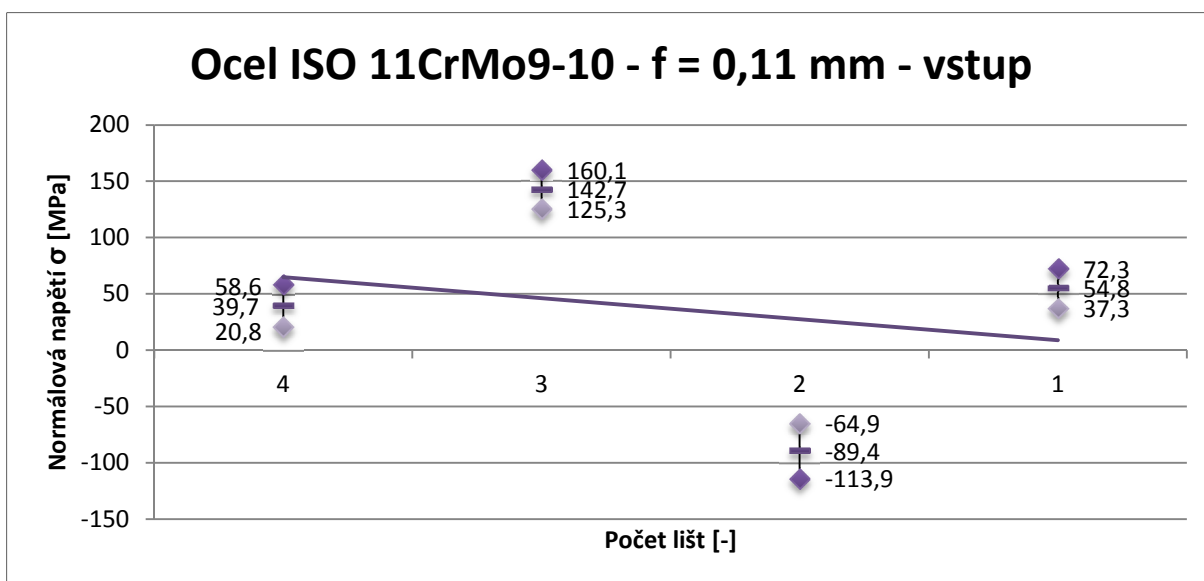


Obr. 4.37 – Závislost normálového napětí σ na posuvu f při 1 liště na výstupu u oceli ISO 11CrMo9-10

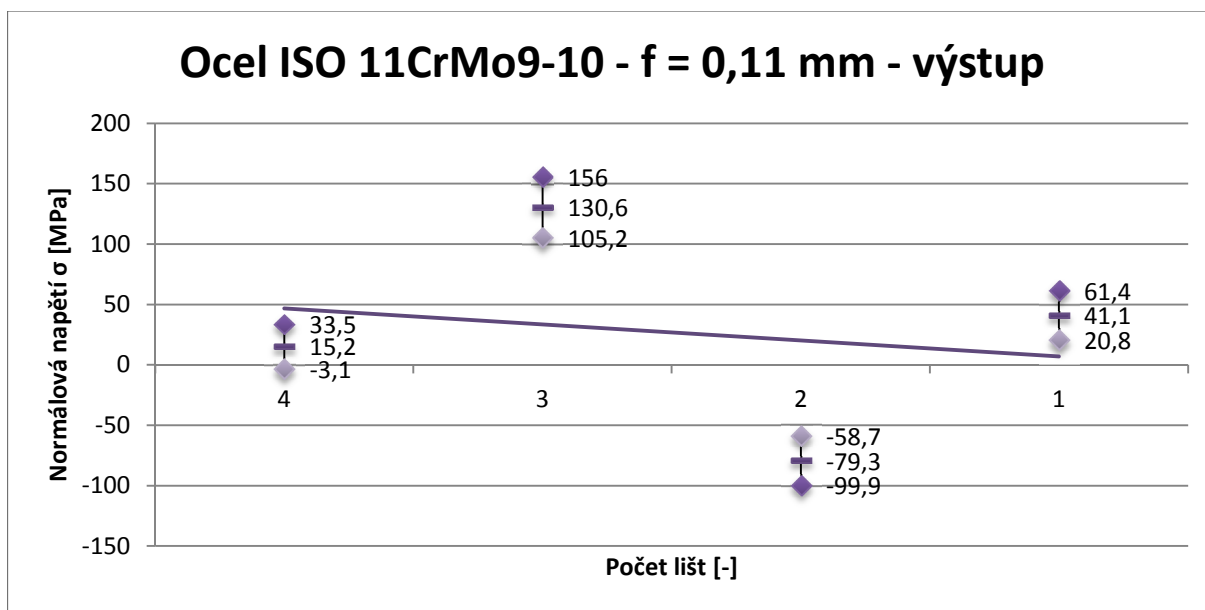
Obrázek 4.36 znázorňuje vstupní hodnoty zbytkových napětí s jednou upnutou lištou. Při všech posuvech hodnoty nepřesahují 100 MPa. Grafické znázornění na obrázku 4.37 vykazuje rostoucí průběh zbytkových napětí. Hodnoty při posuvu 0,2 mm a 0,32 mm jsou až dvojnásobně větší než na vstupu.

Následující grafy znázorňují závislosti normálového napětí na počtu lišt upnutých v přípravku pro vstup a výstup.

▪ $f = 0,11$ mm



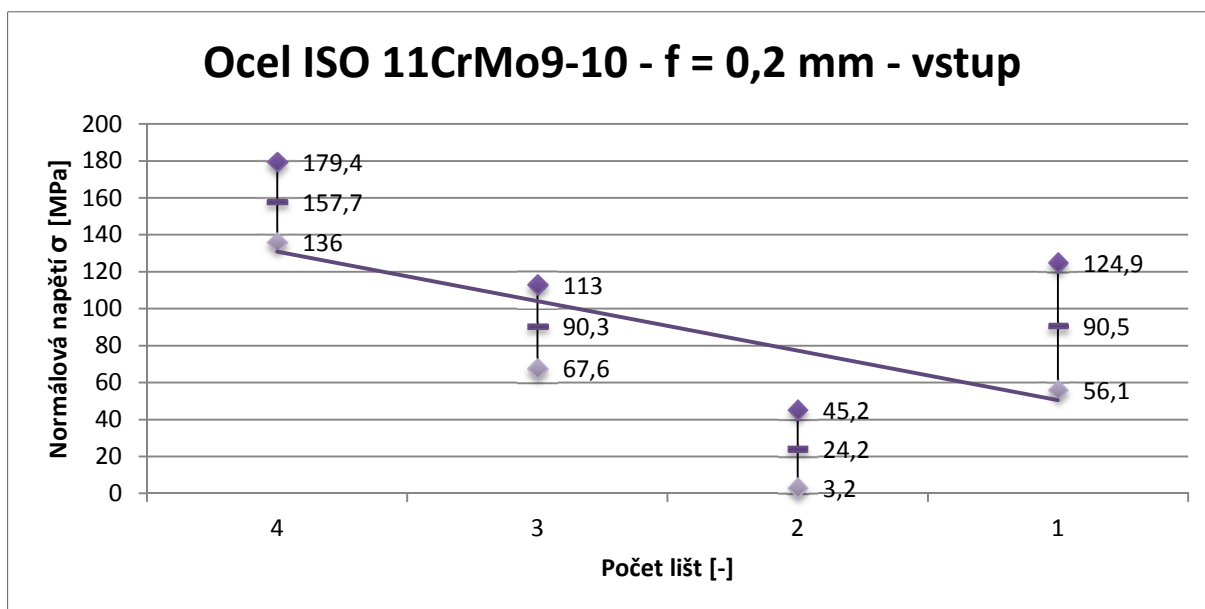
Obr. 4.38 – Závislost normálového napětí σ na počtu upnutých lišt při posuvu f 0,11 mm na vstupu u oceli ISO 11CrMo9-10



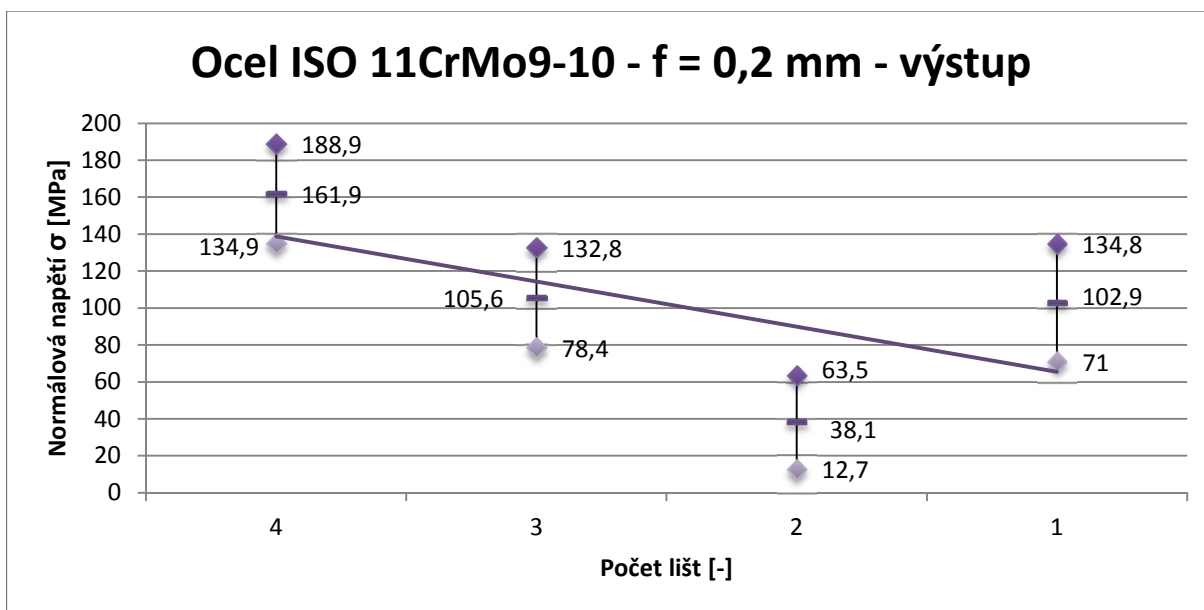
Obr. 4.39 – Závislost normálového napětí σ na počtu upnutých lišt při posuvu $f = 0,11$ mm na výstupu u oceli ISO 11CrMo9-10

Obrázky 4.38 a 4.39 znázorňují velikosti zbytkových napětí materiálu ISO 11CrMo9-10 za hodnoty posuvu 0,11 mm. Vstupní hodnoty mají se snižujícím počtem lišt střídavý průběh. Totéž můžeme říci o výstupním grafu. Ve třetí fázi experimentu se hodnoty napětí přesunula do záporných čísel – tahová napětí.

▪ $f = 0,2$ mm



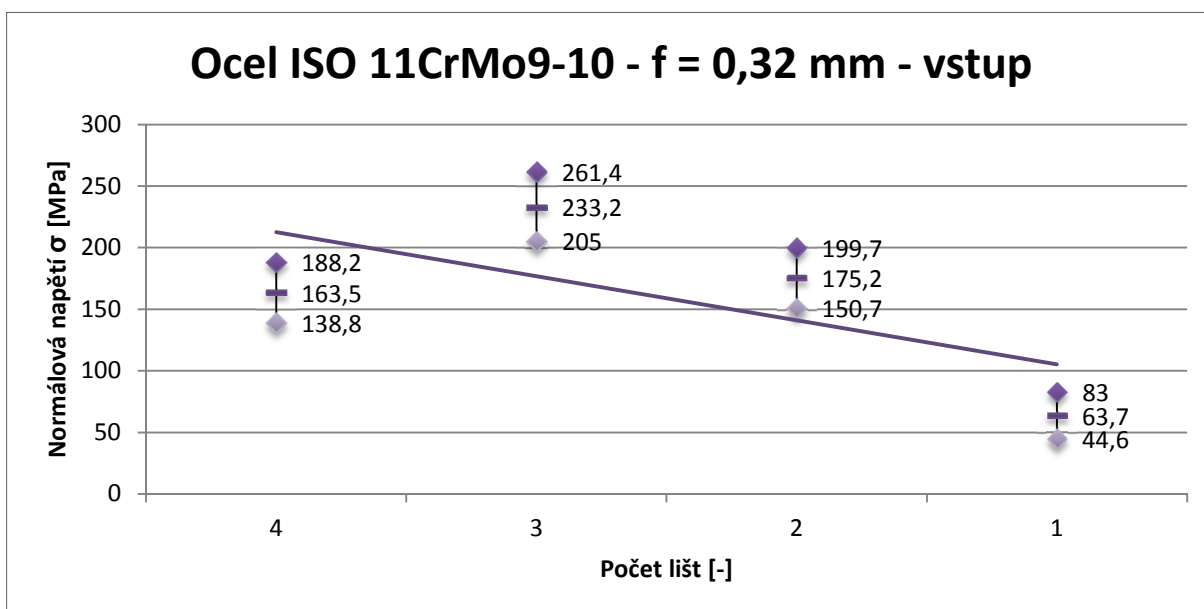
Obr. 4.40 – Závislost normálového napětí σ na počtu upnutých lišt při posuvu $f = 0,2$ mm na vstupu u oceli ISO 11CrMo9-10



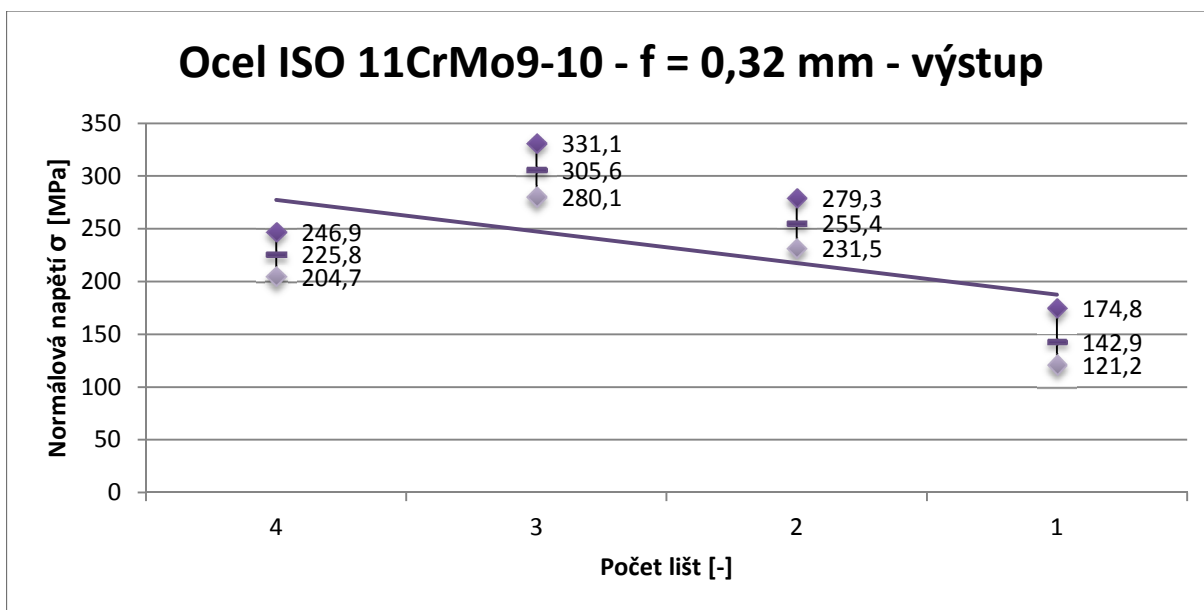
Obr. 4.41 – Závislost normálového napětí σ na počtu upnutých lišt při posuvu $f = 0,2$ mm na výstupu u oceli ISO 11CrMo9-10

S postupným odebráním upnutých lišt z přípravku za posuvu $0,2$ mm mají hodnoty napětí tendenci klesat. Při obrábění s jednou upnutou lištou se hodnoty prudce zvýšily.

- $f = 0,32$ mm



Obr. 4.42 – Závislost normálového napětí σ na počtu upnutých lišt při posuvu $f = 0,32$ mm na vstupu u oceli ISO 11CrMo9-10



Obr. 4.43 – Závislost normálového napětí σ na počtu upnutých lišt při posuvu $f = 0,32$ mm na výstupu u oceli ISO 11CrMo9-10

Obrázky 4.42 a 4.43 popisují, že při posuvu $0,32$ mm hodnoty prudce stouply. Nejvyšší napětí bylo u výstupu ze záběru z materiálu při třech upnutých lištách, a to $331,1$ MPa. Poté hodnoty napětí klesaly.

3.9 Výsledky měření a vyhodnocení drsnosti obrobeného povrchu

Pro zjištění drsnosti povrchu byl použit přenosný drsnoměr Surftest SJ 210 Mitutoyo. Pomocí něj byla změřena drsnost povrchu na každé obrobené ploše. Drsnost každé obrobené plochy byla změřena 5x. V tabulce č. 13 a 14 je uveden vždy aritmetický průměr hodnot. Výsledky byly převedeny do společného grafu (obr. 4.44 a 4.45). Pomocí přenosného drsnoměru byly zjištěny parametry drsnosti jako je R_a – průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu, R_q – průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu a R_z – největší výška profilu.

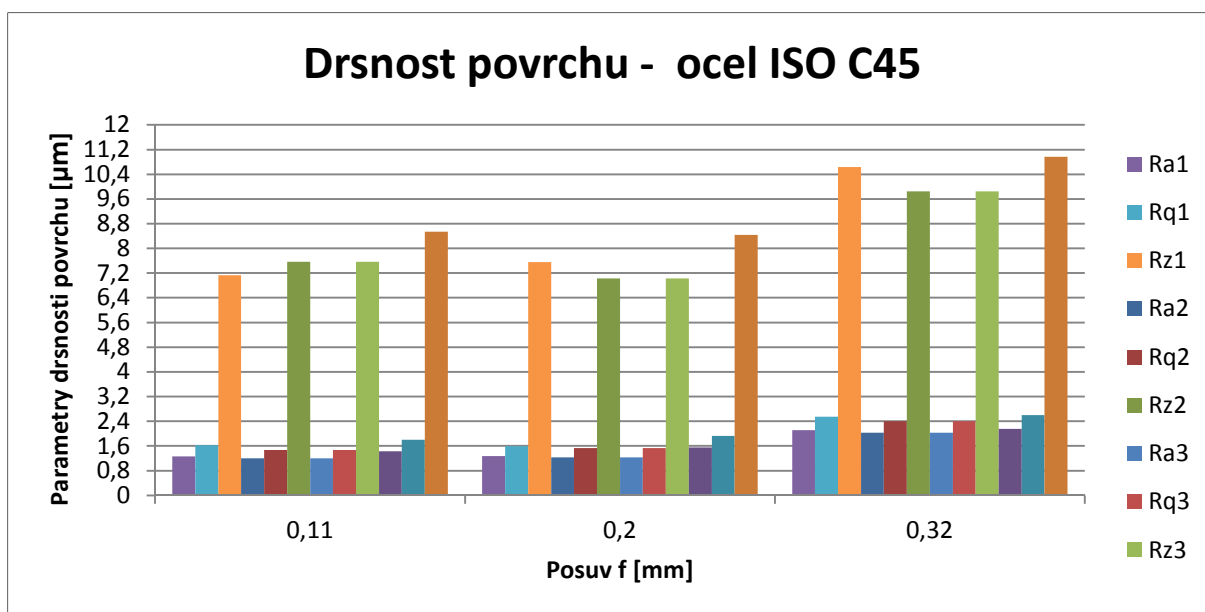


Obr. 4.44 – Drsnoměr SJ 210 – Surftest Mitutoyo

▪ **Ocel ISO C45 (ČSN 12 050)**

Tab. 13 – Naměřené hodnoty parametrů drsnosti oceli ISO C45

Ocel ISO C45 (ČSN 12 050)							
Počet upnutých lišt		4				3	
Posuv f [mm]	Ra [μm]	Rq [μm]	Rz [μm]	Posuv f [mm]	Ra [μm]	Rq [μm]	Rz [μm]
0,11	1,43±0,27	1,80±0,28	8,54±0,94	0,11	1,20±0,16	1,47±0,30	7,57±1,50
0,2	1,55±0,21	1,93±0,26	8,44±0,84	0,2	1,23±0,15	1,54±0,15	7,03±0,15
0,32	2,15±0,28	2,60±0,39	10,97±1,45	0,32	2,03±0,07	2,40±0,07	9,85±0,69
Počet upnutých lišt		2				1	
Posuv f [mm]	Ra [μm]	Rq [μm]	Rz [μm]	Posuv f [mm]	Ra [μm]	Rq [μm]	Rz [μm]
0,11	0,80±0,10	1,01±0,13	4,74±0,77	0,11	1,26±0,39	1,63±0,46	7,14±1,78
0,2	1,22±0,14	1,51±0,19	7,02±0,99	0,2	1,28±0,12	1,60±0,17	7,56±1,12
0,32	2,11±0,07	2,54±0,10	10,76±0,41	0,32	2,11±0,07	2,54±0,05	10,64±0,37



Obr. 4.45 – Hodnoty parametrů drsnosti pro ocel ISO C45

Legenda:

Ra1, Rq1, Rz1 – Parametry drsnosti povrchu při jedné upnuté liště.

Ra2, Rq2, Rz2 – Parametry drsnosti povrchu při dvou upnutých lištách.

Ra3, Rq3, Rz3 – Parametry drsnosti povrchu při třech upnutých lištách.

Ra4, Rq4, Rz4 – Parametry drsnosti povrchu při čtyřech upnutých lištách.

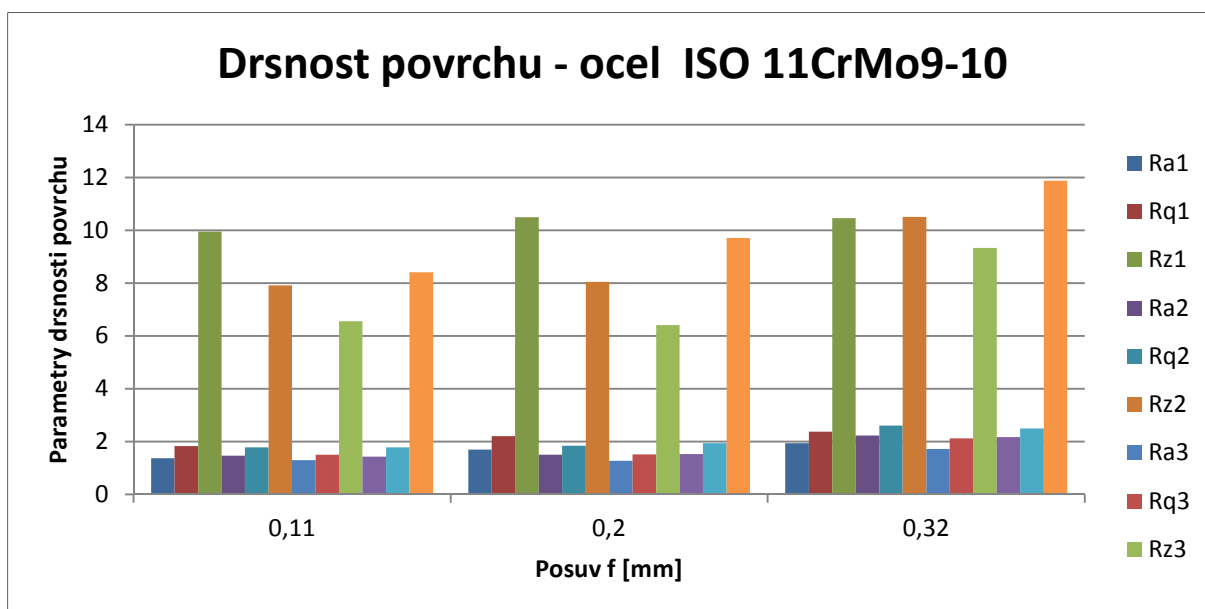
Při porovnání obrobeného povrchu s referenčním materiálem podobné drsnosti se hodnoty pohybovaly v rozsahu Ra (1,6 – 3,2) μm. S využitím drsnoměru bylo zjištěno, že nejlépe obrobený povrch byl při posuvu 0,11 mm se dvěma upnutými

lišťami v přípravku, kdy hodnota průměrné aritmetické odchylky profilu nabývala hodnoty - Ra 0,8 μm . Nejhorší drsnost povrchu pak byla při posuvu 0,32 mm se čtyřmi lišťami - Ra 2,15 μm .

▪ **Ocel ISO 11CrMo9-10 (ČSN 15 128)**

Tab. 14 – Naměřené hodnoty parametrů drsnosti oceli ISO 11CrMo9-10

Ocel ISO 11CrMo9-10 (ČSN 15 128)							
Počet upnutých lišt		4			3		
Posuv f [mm]	Ra [μm]	Rq [μm]	Rz [μm]	Posuv f [mm]	Ra [μm]	Rq [μm]	Rz [μm]
0,11	1,43 \pm 0,22	1,78 \pm 0,25	8,41 \pm 0,94	0,11	1,29 \pm 0,26	1,50 \pm 0,24	6,55 \pm 0,63
0,2	1,52 \pm 0,1	1,93 \pm 0,14	9,72 \pm 0,29	0,2	1,27 \pm 0,16	1,51 \pm 0,16	6,41 \pm 0,77
0,32	2,17 \pm 0,31	2,49 \pm 0,31	11,88 \pm 1,64	0,32	1,72 \pm 0,15	2,12 \pm 0,19	9,34 \pm 1,29
		2			1		
Posuv f [mm]	Ra [μm]	Rq [μm]	Rz [μm]	Posuv f [mm]	Ra [μm]	Rq [μm]	Rz [μm]
0,11	1,46 \pm 0,09	1,78 \pm 0,11	7,91 \pm 0,9	0,11	1,37 \pm 0,23	1,83 \pm 0,32	9,95 \pm 1,59
0,2	1,50 \pm 0,13	1,83 \pm 0,19	8,05 \pm 1,41	0,2	1,69 \pm 0,17	2,20 \pm 0,17	10,50 \pm 0,33
0,32	2,22 \pm 0,09	2,60 \pm 0,08	10,51 \pm 0,41	0,32	1,94 \pm 0,16	2,37 \pm 0,21	10,46 \pm 0,9



Obr. 4.46 – Hodnoty parametrů drsnosti pro ocel ISO 11CrMo9-10

Legenda:

Ra1, Rq1, Rz1 – Parametry drsnosti povrchu při jedné upnuté liště.

Ra2, Rq2, Rz2 – Parametry drsnosti povrchu při dvou upnutých lištách.

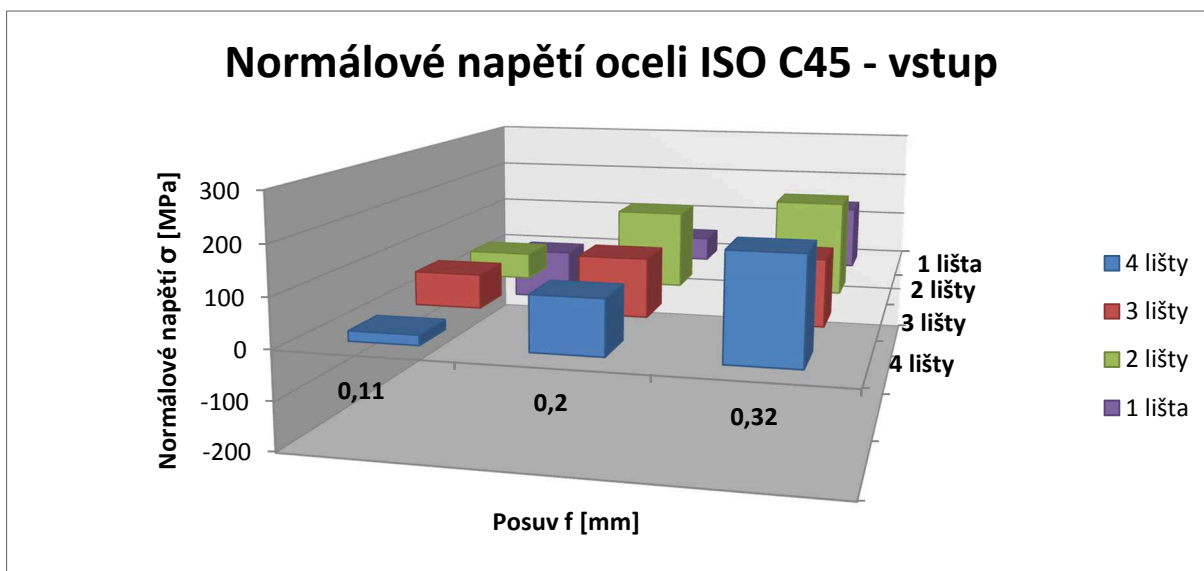
Ra3, Rq3, Rz3 – Parametry drsnosti povrchu při třech upnutých lištách.

Ra4, Rq4, Rz4 – Parametry drsnosti povrchu při čtyřech upnutých lištách.

Opět v porovnání s referenčními vzorky drsnosti obrobený povrch vykazoval hodnoty v rozsahu Ra (1,6 – 3,2) μm . V porovnání s materiálem ISO C45 se povrch oceli ISO 11CrMo9-10 jevil jako hůře obrobený, což tomu nasvědčují i naměřené hodnoty drsnosti. Nejlépe obrobený povrch, tedy průměrná aritmetická odchylka, byl při posuvu 0,2 mm se třemi upnutými lištami - Ra 1,27 μm . Nejhorší dopadl povrch při posuvu 0,32 mm se dvěma lištami, a to Ra 2,22 μm .

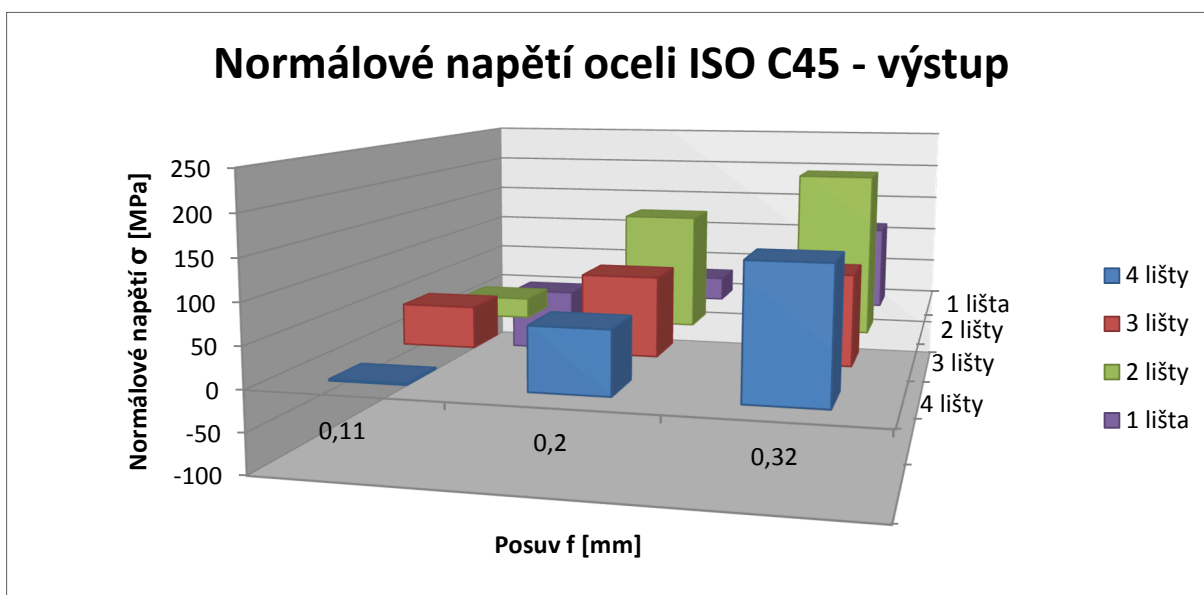
4 ZHODNOCENÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ

Grafy, které jsou uvedeny níže, popisují normálová napětí obou materiálů za daných technologických parametrů.



Obr. 4.47 – Závislost normálového napětí σ na posuvu f vstup – C45

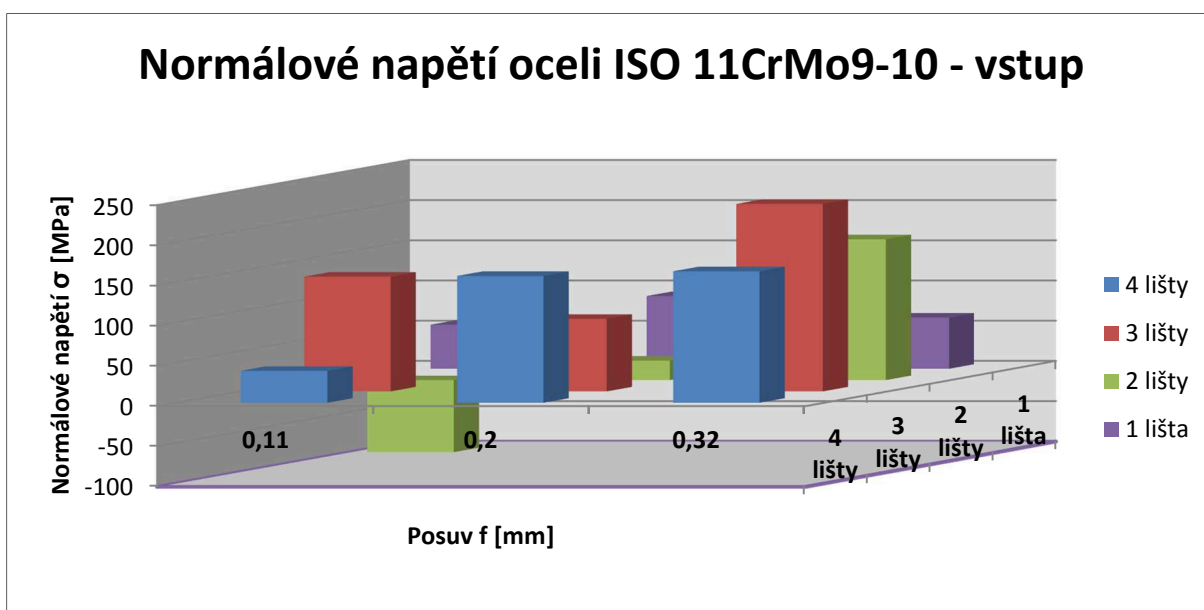
Na uvedeném obrázku (4.47) jsou znázorněny hodnoty pro materiál ISO C45. Jak je patrné, nejnižší hodnota normálového napětí byla naměřena při posuvu 0,11 mm, kdy byly upnuty 4 lišty. Celkově při obrábění s nízkým posuvem jsou hodnoty napětí malá. Změna nastala při obrábění s jednou lištou, kdy napětí zasahovala do záporných hodnot - napětí byla tahová. Při vyšších posuvech se hodnoty pohybovaly v oblasti napětí tlakových.



Obr. 4.48 – Závislost normálového napětí σ na posuvu f výstup – C45

Obrázek 4.48 popisuje opět hodnoty zbytkových napětí materiálu ISO C45, ovšem se zde jedná o hodnoty, kdy nástroj vystupoval ze záběru. Ve srovnání s předešlým grafem se charakter napětí výrazně neliší. Opět nejnižší zbytkové pnutí můžeme pozorovat při posuvu 0,11 mm, kdy hodnota byla téměř nulová. Vysoký nárůst lze pozorovat u posuvu 0,32 mm se dvěma upnutými lištami, kdy se hodnota normálového napětí zvýšila téměř o dvojnásobek své hodnoty.

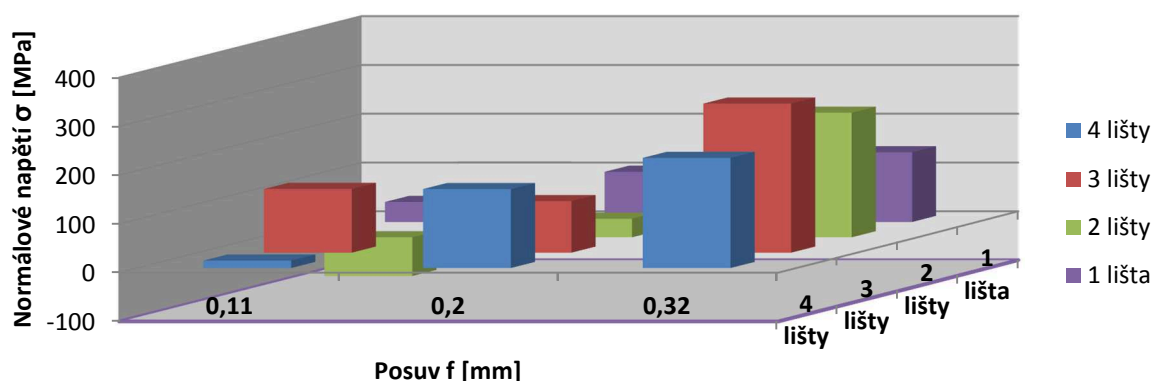
Na následujících obrázcích jsou opět porovnány hodnoty normálového napětí při třech posuvech, tentokrát pro materiál ISO 11CrMo9-10.



Obr. 4.49 – Závislost normálového napětí σ na posuvu f vstup – ISO 11CrMo9-10

Obrázek 4.49 graficky popisuje vzniklé napětí, které bylo naměřeno v materiálu ISO 11CrMo9-10 ve vstupních bodech. Se zvyšujícím posuvem u pravidelného přerušovaného řezu napětí rostlo. Výraznou změnu můžeme pozorovat v době, kdy v přípravku byly upnuty dvě lišty. Napětí tahová se změnila na tlaková a hodnoty postupně rostly.

Normálové napětí oceli ISO 11CrMo9-10 - výstupu



Obr. 4.50 – Závislost normálového napětí σ na posuvu f výstupu – ISO 11CrMo9-10

S postupným vyjímáním lišt z přípravku během obrábění s posuvem 0,11 mm měly hodnoty napětí střídavých charakter. Nejnižší hodnota, opět pohybující se v okolí nuly, byla při pravidelném přerušovaném řezu. Nárůst napětí lze vypořizovat po odebrání jedné lišty z přípravku.

ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo vyhodnotit povrchová napětí v materiálu, který byl obroben za daných technologických podmínek a porovnat hodnoty normálových napětí na vstupu nástroje do materiálu a výstupu z něj. Celá experimentální část práce byla realizována ve spolupráci s Žilinskou univerzitou v Žilině. Pro proces obrábění byl použit přípravek simulující přerušovaný řez, do kterého byly postupně upnuty lišty z oceli ISO C45 a ISO 11CrMo9-10. Vlivem změny technologických parametrů, konkrétně posuvu a postupného vyjmutí všech lišt z přípravku, docházelo ke značnému obvodovému házení. Tyto zmíněné důvody mohly výrazně ovlivnit charakter zbytkových napětí a kvalitu obrobeného povrchu materiálu.

Výsledky měření zbytkových pnutí pomocí rentgenové difrakce potvrdily výskyt pnutí v obou materiálech. U oceli ISO C45 můžeme konstatovat, že se zvyšující hodnotou posuvu normálová napětí v povrchové vrstvě rostou jak pro vstupní, tak i výstupní body. V porovnání se vstupními hodnotami se napětí na výstupu snížila až o polovinu své počáteční hodnoty. Napětí při posuvu 0,32 mm dosahují velikosti 210 MPa. Povrch vzniklý za pravidelného přerušovaného řezu s nastaveným posuvem $f = 0,11$ mm vykazoval nejnižší hodnotu normálového napětí – tlakové napětí. Na výstupním bodě bylo dosaženo hodnoty pouze $(1,6 \pm 7,9)$ MPa, což se přibližuje k teorii o zbytkových napětích, kdy optimální velikost je rovna nule. Při obrábění lišt za nepravidelného přerušovaného řezu s jednou upnutou lištou v přípravku, materiál po změření vykazoval záporné hodnoty napětí – tedy napětí tahové, jak na vstupním, tak i výstupním bodě. Se zvyšujícím se posuvem pak napětí opět měla tendenci zasahovat do oblasti tlaku. Změnu jejich charakteru mohla ovlivnit zmíněná nevyváženost přípravku a s tím spojené vibrace.

Vyhodnocená zbytková pnutí u oceli ISO 11CrMo9-10 se podstatně liší od pnutí předešlého materiálu. Při postupném odebírání lišt z přípravku u posuvu 0,11 mm hodnoty na výstupním bodě byly nižší jako na vstupu. Oproti tomu se zvýšenou hodnotou posuvu se velikost napětí na výstupu zvýší o desítky megapascalů v porovnání se vstupními hodnotami. Po celou dobu obrábění se napětí pohybují v oblasti kladných hodnot – tlak. Při odebrání druhé lišty z přípravku dojde ke změně a hodnoty při posuvu 0,11 mm se objeví v záporných číslech – tahová napětí. Nejvyšší hodnota napětí byla naměřena při třech upnutých lištách během obrábění na výstupním bodě za posuvu 0,32 mm, a to $(305,6 \pm 25,5)$ MPa. Změna

průběhu zbytkových napětí v tomto případě mohla být opět ovlivněna vibracemi přípravku, ale také změnou materiálu, kdy se jednalo o žárovevnu ocel.

Z naměřených výsledků můžeme potvrdit, že obrábění s využitím přerušovaného řezu zajišťuje výskyt TLAKOVÝCH zbytkových napětí v materiálu. Se zvyšujícími řeznými parametry tyto hodnoty převážně rostou. V důsledku obrábění se silně nepravidelným přerušovaným řezem se v materiálu vyskytují i napětí TAHOVÁ.

Hodnoty parametru drsnosti R_a u obou materiálů s postupným zvyšováním posuvu rostou. Drsnost odpovídala tabulkovým hodnotám pro soustružení načisto, v rozsahu (1,20 – 2,15) μm . Nejlepší povrch u oceli ISO C45 byl obroben za podmínek posuvu 0,11 mm se dvěma lištami v přípravku, kdy parametr R_a nabyl hodnoty 0,8 μm . Při porovnání všech naměřených hodnot u obou materiálů je jakost povrchu podobná.

V současné době se můžeme setkat i s výrobky mnohonásobných rozměrů, jako jsou těžké dílce, výrobky pro lodní průmysl nebo odlitky vyrobeny z různých druhů materiálů. Všechny tyto součásti musí splňovat požadované vlastnosti z důvodu funkčnosti a bezpečnosti. Na to mají vliv právě i zbytková napětí obsažená v materiálu. Se zvýšenou hodnotou napětí, jak tlakového, tak i tahového dochází ke změně mechanických vlastností v materiálu, ale také například k projevům koroze. Zajištění vhodných parametrů obrábění, aby došlo k optimálnímu rozložení pnutí v celém objemu materiálu, nejlépe k nabytí nulových hodnot, by zvýšilo životnost součásti a ušetřilo náklady na jejich případné opravy.

PODĚKOVÁNÍ

Chtěla bych poděkovat panu doc. Ing. Robertu Čepovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky při vypracování mé diplomové práce.

Dále mé díky patří i kolegům z Žilinské univerzity v Žilině za poskytnutí prostor a přístrojů k provedení experimentální činnosti.

Poděkování také patří mé rodině, která mě během studia podporovala.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BILÍK, Oldřich. *Obrábění II*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 1994, 131 s. ISBN 80-707-8228-5.
- [2] KOČMAN, Karel. *Technologie obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2001, 270 s. ISBN 80-214-1996-2.
- [3] MÁDL, Jan a Vilém SCHUBERT. *Experimentální metody a optimalizace v teorii obrábění*. Praha: Ediční středisko ČVUT Praha, 1983, 171 s.
- [4] VÁCLAVÍK, Jaroslav, Zbyněk BUNDA a Otakar WEINBERG. APLIKACE VYBRANÝCH METOD PRO MĚŘENÍ ZBYTKOVÉHO NAPĚTÍ. In: *NDT net* [online]. 2012 [cit. 2014-12-20]. Dostupné z: http://www.ndt.net/article/defektoskopie2012/papers/271_p.pdf
- [5] SVANTER, Michal. Odvrtávací metoda pro měření zbytkových napětí ve výzkumu a v průmyslu. In: *Západočeská univerzita v Plzni* [online]. 2013 [cit. 2014-12-20]. Dostupné z: http://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CCIQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.opi.zcu.cz%2Fdownload%2F3_Svantner.pptx&ei=MV6VVlexEK0sASg4IKADw&usg=AFQjCNH76F5v9Yzt8tGes17d2iU3JDKx8g&sig2=krpYz5m6BTjxeBTIOsIKAQ&bvm=bv.82001339,d.cWc
- [6] *Residual Stress* [online]. 2010 [cit. 2014-12-20]. Dostupné z: <http://www.residualstress.org/>
- [7] VLK, Miloš, Lubomír HOUFEK, Pavel HLAVOŇ, Petr KREJČÍ, Vladimír KOTEK a Jiří KLEMENT. *Experimentální mechanika*. Brno, 2003, 147 s. Dostupné z: http://ean2011.fme.vutbr.cz/img/fckeditor/file/opory/Experimentalni_mechanika.pdf
- [8] BUMBÁLEK, Bohumil. INTEGRITA POVRCHU A JEJÍ VÝZNAM PRO POSOUZENÍ VHODNOSTI DANÉ PLOCHY PRO JEJÍ FUNKCI. *Consulting point* [online]. 2012 [cit. 2014-12-20]. Dostupné z: <http://cp.forever.cz/node/78>
- [9] WITHERS, P.J. a H.K.D.H. BHADESHIA. Residual stress. In: *Part 1 – Measurement techniques* [online]. 2001 [cit. 2014-12-20]. Dostupné z: http://kntu.ac.ir/DorsaPax/userfiles/file/Mechanical/OstadFile/dr_nakhodchi/Part1.pdf
- [10] ČEP, Robert a Jana PETRŮ. *Experimentální metody v obrábění*. Vyd. 1. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2011, 1 CD-ROM. ISBN 978-80-248-2533-5. Dostupné z: http://projekty.fs.vsb.cz/459/ucebniopory/Experimentalni_metody_%20v_obrabeni.pdf

- [11] MALEC, Jiří. Integrita povrchu, brusné spáleniny a přístrojové možnosti hodnocení. In: *PCS: Řešení pre vaše technológie, technológie pre vaše řešení* [online]. 2010 [cit. 2014-12-20]. Dostupné z: http://www.pcs.sk/pcssro_cz_analytika_cs/download/integrita-povrchu.pdf
- [12] Zbytková pnutí a defektoskopie: Nauka o materiálu. In: *Fakulta strojní - VŠB TU Ostrava* [online]. 2008 [cit. 2014-12-20]. Dostupné z: http://www.fs.vsb.cz/export/sites/fs/339/.content/files/Slide8_ZbytkovaNapeti_NDT.pdf
- [13] DÖMÉNY, Tibor. *Analýza vlivu parametrů procesu broušení na integritu obrobené plochy se zaměřením na zbytková napětí*. Brno, 2009. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [14] ROSSINI, N.S. *Materials in engineering: Methods of measuring residual stresses in components*. Itálie: Mechanical and Management Engineering Department, 2012, 572–588 s. ISBN 0261-3069.
- [15] GAZDA, Jaromír. *Teorie obrábění: průvodce tvorbou třísky*. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2004. ISBN 80-7083-789-6
- [16] EVERS, Derrick. Interrupted Turning: Innovations in turning tooling combat the challenges of interrupted cutting. *Canada's Metalworking & Fabricating Technology Magazine*. 2009, č. 9. Dostupné z: <http://www.cimindustry.com/article/tooling/interrupted-turning>
- [17] KOUŘIL, Karel. Odolnost slinutých karbidů proti teplotním a mechanickým rázům. *MM Průmyslové spektrum*. Praha: Vogel Publishing, 2004, č. 5. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/odolnost-slinutych-karbidu-proti-teplotnim-a-mechanickym-razum-2.html>
- [18] PFEILER, Petr. *Metodika testování keramických řezných nástrojů při přerušovaném řezu*. Ostrava, 2012. 147 s. Disertační práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
- [19] REINER, Pavel. *Zkoušky nástrojů z řezné keramiky na simulátoru přerušovaného řezu*. Ostrava, 2009. 78 s. Diplomová práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
- [20] JAŠŠ, Pavel. *Zkoušky odolnosti vyměnitelných břitových destiček ze slinutých karbidů při přerušovaném řezu*. Ostrava, 2009. 108 s. Diplomová práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.

- [21] ČEP, Robert. *Návrh a ověření metodiky testování řezných nástrojů při přerušovaném řezu*. Ostrava, 2010. 119 s. Habilitační práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
- [22] Interrupted Cuts. In: *Greenleaf: Excelerating Solutions* [online]. 2009 [cit. 2014-12-20]. Dostupné z: <https://www.greenleafglobalsupport.com/wcsstore/Greenleaf/upload/docs/Interrupted%20Cuts.pdf>
- [23] BÁTORA, Bohumil a Karol VASILKO. *Obrobené povrchy: technologická dedičnosť, funkčnosť*. Trenčín: Trenčianska Univerzita, 2000, 175 s. ISBN 80-88914-19-1.
- [24] KYNCL, Ladislav. *Experimentální hodnocení stavu ostří nástrojů z oxidické keramiky při nepravidelném přerušovaném řezu*. Ostrava, 2013. 51 s. Diplomová práce. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava.
- [25] CZ FERRO Steel. ČSN 12 050 – konstrukční ocel. *Czferrosteel.cz* [online]. © 2011 [cit. 2015-02-23]. Dostupné z: <http://www.czferrosteel.cz/pdf/tyce-12050.pdf>
- [26] ČSN 41 5128. *Československá statní norma*. Hradec Králové: TECHNOR Hradec Králové, 1984. Dostupné z: http://www.technicke-normy-csn.cz/inc/nahled_normy.php?norma=415128-csn-41-5128&kat=27353
- [27] Vyměnitelné břitové destičky CNMG: Soustružení. *ECatalog Pramet Tools s.r.o.* [online]. 2014 [cit. 2015-02-28]. Dostupné z: <http://ecat.pramet.com/>
- [28] PCLNR 2525M 12. SANDVIK Coromant [online]. 2006 [cit. 2015-02-28]. Dostupné z: <http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/pages/productdetails.aspx?c=PCLNR%202525M%2012&m=5738416>
- [29] DRBÚL, Mário, Michal ŠAJGALÍK, Ján ŠEMCER, Tatiana CZÁNOVÁ, Lenka PETŘKOVSKÁ a Lenka ČEPOVÁ. *Strojárska metrológia a kvalita povrchov vytvorených technológiami obrábania*. Žilina: ŽU v Žilině, 2014, 115 s
- [30] An Introduction: X-ray Diffraction Residual Stress Measurement. In: *Protoxrd* [online]. 2011 [cit. 2015-03-07]. Dostupné z: www.protoxrd.com

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2.1 – Příklad přerušovaného řezu	10
Obr. 2.2 – Schéma přípravku pro lištový test	11
Obr. 2.3 – Schéma přípravku s dvěma podélnými drážkami	12
Obr. 2.4 – Schéma čepového testu	12
Obr. 2.5 – Schéma zkoušky čelního frézování	13
Obr. 2.6 – Schéma zkoušky vodorovného obrážení	14
Obr. 3.1 – Napětí	15
Obr. 3.2 – Průběh zbytkových pnutí	17
Obr. 3.3 – Průběhy makro-, mikroskopických napětí	20
Obr. 3.4 – Rozdělení metod z hlediska celistvosti	21
Obr. 3.5 – Dělicí metoda	24
Obr. 3.6 – Odvrtávací metoda Obr. 3.7 – Metoda mezikruží	25
Obr. 3.8 – Původní uspořádání Barkhausenova šumu	26
Obr. 3.9 – Schéma závislosti vzdálenosti krystalografických rovin od zbytkového napětí	27
Obr. 4.1 – Schéma přípravku – Simulátor přerušovaného řezu	28
Obr. 4.2 – Čelní pohled na simulátor přerušovaného řezu	28
Obr. 4.3 – Přípravek upnutý na soustruhu	29
Obr. 4.4 – Schéma demontovaného přípravku	29
Obr. 4.5 – Lišty po úpravě	29
Obr. 4.6 – Soustruh SN 55	30
Obr. 4.7 – VBD z SK	30
Obr. 4.8 – Použitá destička z SK	31
Obr. 4.9 – Použitý nástroj	31
Obr. 4.10 – Materiál před obráběním	32
Obr. 4.11 – Lišta po obrobení	33
Obr. 4.12 – Obrobené lišty a) Ocel ISO C45, b) Ocel ISO 11CrMo9-10	33
Obr. 4.13 – Zařízení Proto iXRD	35
Obr. 4.14 – Znárodnění difrakčního kužele a výstupní křivky	36
Obr. 4.15 – Rozložení bodů pro měření	38
Obr. 4.16 – Závislost normálového napětí σ na posuvu f při 4 lištách na vstupu u oceli ISO C45	39
Obr. 4.17 – Závislost normálového napětí σ na posuvu f při 4 lištách na výstupu u oceli ISO C45	39

Obr. 4.18 – Závislost normálového napětí σ na posuvu f při 3 lištách na vstupu u oceli ISO C45	40
Obr. 4.19 – Závislost normálového napětí σ na posuvu f při 3 lištách na výstupu u oceli ISO C45	40
Obr. 4.20 – Závislost normálového napětí σ na posuvu f při 2 lištách na vstupu u oceli ISO C45	41
Obr. 4.20 – Závislost normálového napětí σ na posuvu f při 2 lištách na výstupu u oceli ISO C45	41
oceli ISO C45	42
Obr. 4.23 – Závislost normálového napětí σ na posuvu f při 1 liště na výstupu u oceli ISO C45	42
. Obr. 4.24 – Závislost normálového napětí σ na počtu lišt při posuvu 0,11 mm na vstupu u oceli ISO C45	43
Obr. 4.25 – Závislost normálového napětí σ na počtu lišt při posuvu 0,11 mm na výstupu u oceli ISO C45	43
Obr. 4.26 – Závislost normálového napětí σ na počtu lišt při posuvu 0,2 mm na vstupu u oceli ISO C45	44
. Obr. 4.27 – Závislost normálového napětí σ na počtu lišt při posuvu 0,2 mm na výstupu u oceli ISO C45	44
Obr. 4.28 – Závislost normálového napětí σ na počtu lišt při posuvu 0,32 mm na vstupu u oceli ISO C45	45
Obr. 4.29 – Závislost normálového napětí σ na počtu lišt při posuvu 0,32 mm na výstupu u oceli ISO C45	45
Obr. 4.30 – Závislost normálového napětí σ na posuvu f při 4 lištách na výstupu u oceli ISO 11CrMo9-10	46
Obr. 4.31 – Závislost normálového napětí σ na posuvu f při 4 lištách na výstupu u oceli ISO 11CrMo9-10	47
Obr. 4.32 – Závislost normálového napětí σ na posuvu f při 3 lištách na vstupu u oceli ISO 11CrMo9-10	47
Obr. 4.33 – Závislost normálového napětí σ na posuvu f při 3 lištách na výstupu u oceli ISO 11CrMo9-10	48
Obr. 4.34 – Závislost normálového napětí σ na posuvu f při 2 lištách na vstupu u oceli ISO 11CrMo9-10	48
Obr. 4.35 – Závislost normálového napětí σ na posuvu f při 2 lištách na výstupu u oceli ISO 11CrMo9-10	49
Obr. 4.36 – Závislost normálového napětí σ na posuvu f při 1 liště na vstupu u oceli ISO 11CrMo9-10	49

Obr. 4.37 – Závislost normálového napětí σ na posuvu f při 1 liště na výstupu u oceli ISO 11CrMo9-10	50
Obr. 4.38 – Závislost normálového napětí σ na počtu upnutých lišt při posuvu f 0,11 mm na vstupu u oceli ISO 11CrMo9-10	50
Obr. 4.39 – Závislost normálového napětí σ na počtu upnutých lišt při posuvu f 0,11 mm na výstupu u oceli ISO 11CrMo9-10	51
Obr. 4.40 – Závislost normálového napětí σ na počtu upnutých lišt při posuvu f 0,2 mm na vstupu u oceli ISO 11CrMo9-10	51
Obr. 4.41 – Závislost normálového napětí σ na počtu upnutých lišt při posuvu f 0,2 mm na výstupu u oceli ISO 11CrMo9-10	52
Obr. 4.42 – Závislost normálového napětí σ na počtu upnutých lišt při posuvu f 0,32 mm na vstupu u oceli ISO 11CrMo9-10	52
Obr. 4.43 – Závislost normálového napětí σ na počtu upnutých lišt při posuvu f 0,32 mm na výstupu u oceli ISO 11CrMo9-10	53
Obr. 4.44 – Drsnoměr SJ 210 – Surftest Mitutoyo	53
Obr. 4.45 – Hodnoty parametrů drsnosti pro ocel ISO C45.....	54
Obr. 4.46 – Hodnoty parametrů drsnosti pro ocel ISO 11CrMo9-10.....	55
Obr. 4.47 – Závislost normálového napětí σ na posuvu f vstup – C45	57
Obr. 4.48 – Závislost normálového napětí σ na posuvu f výstup – C45	57
Obr. 4.49 – Závislost normálového napětí σ na posuvu f vstup – ISO 11CrMo9-10	58
Obr. 4.50 – Závislost normálového napětí σ na posuvu f výstup – ISO 11CrMo9-10	59

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 – Přehled metod pro měření zbytkových pnutí.....	22
Tab. 2 – Technické parametry stroje	30
Tab. 3 – Geometrie nástroje	31
Tab. 4 – Značení oceli ISO C45 dle norem.....	32
Tab. 5 – Chemické vlastnosti oceli ISO C45.....	32
Tab. 6 – Mechanické vlastnosti oceli ISO C45.....	32
Tab. 7 – Značení oceli ISO 11CrMo9-10 dle norem.....	32
Tab. 8 – Chemické složení oceli ISO 11CrMo9-10	32
Tab. 9 – Mechanické vlastnosti oceli ISO 11CrMo9-10.....	32
Tab. 10 – Schéma experimentu.....	34
Tab. 11 – Naměřené hodnoty normálového napětí oceli ISO C45	38
Tab. 12 – Naměřené hodnoty normálového napětí oceli ISO 11CrMo9-10	46
Tab. 13 – Naměřené hodnoty parametrů drsnosti oceli ISO C45	54
Tab. 14 – Naměřené hodnoty parametrů drsnosti oceli ISO 11CrMo9-10.....	55

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A	Výstupní protokol o zbytkových napětích u oceli ISO C45
Příloha B	Výstupní protokol o zbytkových napětích u oceli ISO 11CrMo9-10

PŘÍLOHA A

Výstupní protokol o zbytkových napětích pro ocel C45

STRESS REPORT

File name: 12050-1a.mt
 Gain file: D:\Ostrava\05MAR15_0
 052.Gain
 User KOVT
 Date: March, 05, 2015,
 20:12:02
 Description 12050-1a
 Job #:
 Part #:

Stress = +83.2 ± 23.8 MPa

ShearStress = 81.9 ± 9.6 MPa

Intensity Ratio: 1.41
 1.58
 Average Peak 2.98 ± 0.10 2.98 ±
 Breadth: 0.09
 Average Peak 2.650 ± 0.14
 FWHM: 2.626 ± 0.10

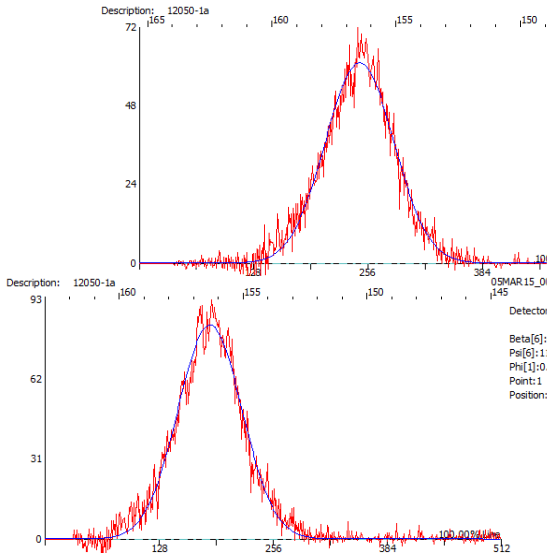
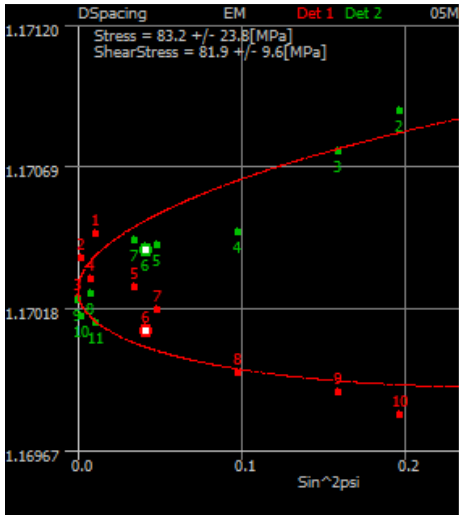
Detector : 1

eta Angles	si	in^2p si	Spacin g	The ta	train* E3	WH M	readt h	ntens ity
8.00	.20	.0117	.1704 44	56.3 0	.201	.601	.06	6.24
4.59	.80	.0024	.1703 61	56.3 4	.130	.693	.03	1.11
1.80	0.0 0	.0000	.1702 17	56.4 1	.007	.687	.00	5.90
.52	5.2 7	.0084	.1702 85	56.3 7	.065	.526	.93	7.12
.04	10. 75	.0348	.1702 53	56.3 9	.038	.551	.94	5.56
.00	11. 80	.0418	.1700 97	56.4 6	0.096	.717	.01	1.76
1.04	12. 84	.0494	.1701 75	56.4 3	0.029	.784	.01	8.46
6.52	18. 32	.0988	.1699 50	56.5 3	0.221	.798	.03	6.21
11.8 0	23. 59	.1602	.1698 79	56.5 7	0.282	.671	.98	6.10

14.5 9	26. 39	.1975	.1698 00	56.6 0	0.349	.792	.10	3.15
18.0 0	29. 80	.2469	.1698 27	56.5 9	0.326	.326	.72	5.21

Detector : 2

eta Ang les	si	in^2p si	Spacin g	The ta	train* E3	WH M	readt h	ntens ity
8.00	9.8 0	.2469	.1710 69	56.0 1	.735	.547	.82	7.89
4.59	6.3 9	.1975	.1708 86	56.0 9	.579	.550	.91	9.76
1.80	3.5 9	.1602	.1707 40	56.1 6	.454	.542	.91	7.19
.52	8.3 2	.0988	.1704 51	56.3 0	.207	.533	.93	00.74
.04	2.8 4	.0494	.1704 07	56.3 2	.170	.838	.14	8.97
.00	1.8 0	.0418	.1703 90	56.3 3	.155	.662	.98	3.42
1.04	0.7 5	.0348	.1704 26	56.3 1	.185	.574	.04	4.20
6.52	.27	.0084	.1702 34	56.4 0	.021	.660	.05	5.78
11.8 0	.00	.0000	.1702 07	56.4 1	0.001	.555	.95	4.20
14.5 9	2.8 0	.0024	.1701 53	56.4 4	0.048	.732	.03	9.33
18.0 0	6.2 0	.0117	.1701 30	56.4 5	0.067	.696	.03	3.56



PARAMETERS

Material : STEEL - FERRITIC (Cr_Ka)
(BCC, hkl-211)
Tube: Cr_K-Alpha
Wavelength: 2.291
KV:20.00; mA:4.00
Beta Osc:3.00; Phi Osc:0.00; X Osc:0.00;
Y Osc:0.00;
Exp. time: 1.20 1.20
Nr of exp: 20 20
Aperture : 1
Filters :

Background static fit:

LeftStartPixel : 99 44
RightStartPixel: 363 307
ROI Left: 85 41

Comments:

B# 1, F#: 015CD4AE, S#: 7, B# 1, F#: 015CD4AE, S#: 7,

Units: MPa

Bragg Angle: 156.41
Peak Location : Gaussian 100%
Gain Correction: P/G(s)
PeakShift: Absolute Peak

(1/2)S2:5.92 E-6 [1/MPa] -SI:1.28
E-6 [1/MPa]
DSpacing (Angstroms): 1.1702087
LPA Correction: YES
Psi Zero Assignment (Pixel) : 248.16
183.25

LeftStopPixel : 109 54
RightStopPixel : 373 317
ROI Right : 392 339

PŘÍLOHA B

Výstupní protokol o zbytkových napětích pro ocel

11CrMo9-10

STRESS REPORT

File name: 15 128-1a.mt
 Gain file: D:\Ostrava\05MAR15_
 0002.Gain
 User KOVT
 Date: March, 05, 2015,
 10:08:25
 Description 15 128-1a
 Job #:
 Part #:

Stress = $+26.3 \pm 16.0$ MPa

ShearStress = 117.1 ± 6.5 MPa

Intensity Ratio: 1.35
 1.44
 Average Peak 2.66 \pm 0.09 2.45 \pm
 Breadth: 0.14
 Average Peak 2.513 \pm 0.16 2.255 \pm
 FWHM: 0.12

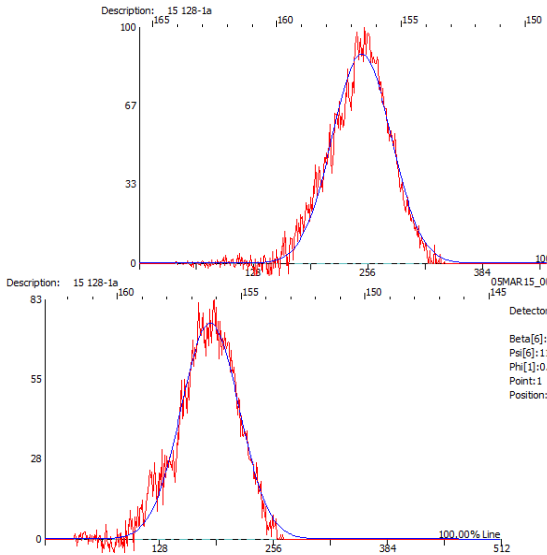
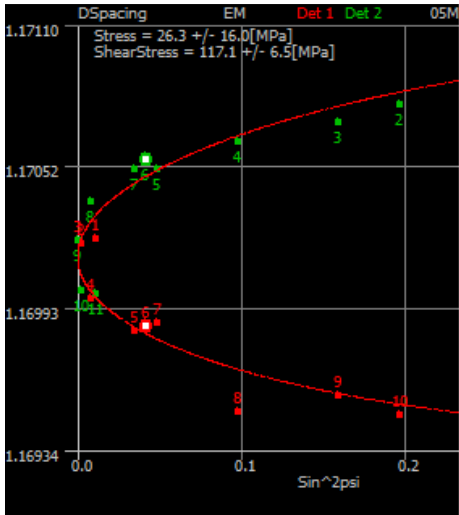
Detector : 1

eta Angles	si	in^2p si	Spacin g	The ta	train* E3	WH M	readt h	ntens ity
8.00	.20	.0117	.1702 15	56.4 1	.006	.450	.62	2.82
4.59	.79	.0024	.1701 98	56.4 2	0.009	.493	.69	8.03
1.80	.00	.0000	.1702 09	56.4 1	.000	.147	.52	5.69
.52	5.2 8	.0085	.1699 73	56.5 2	0.202	.570	.71	7.58
.04	10. 76	.0348	.1698 35	56.5 9	0.319	.440	.63	7.96
.00	11. 80	.0418	.1698 56	56.5 8	0.302	.481	.64	9.94
1.04	12. 84	.0493	.1698 69	56.5 7	0.290	.621	.71	03.30
6.52	18. 32	.0987	.1694 99	56.7 5	0.606	.807	.87	3.62
11.8 0	23. 60	.1602	.1695 67	56.7 1	0.548	.492	.60	04.31

14.5 9	26. 39	.1975	.1694 91	56.7 5	0.613	.607	.60	05.27
18.0 0	29. 80	.2469	.1696 06	56.6 9	0.515	.533	.67	04.00

Detector : 2

eta Ang les	si	in^2p si	Spacin g	The ta	train* E3	WH M	readt h	ntens ity
8.00	9.8 0	.2469	.1709 56	56.0 6	.638	.105	.26	4.26
4.59	6.3 9	.1975	.1707 72	56.1 5	.482	.208	.34	01.98
1.80	3.6 0	.1602	.1706 96	56.1 8	.416	.199	.37	04.36
.52	8.3 2	.0987	.1706 16	56.2 2	.348	.122	.37	08.24
.04	2.8 4	.0493	.1705 02	56.2 7	.251	.399	.64	7.68
.00	1.8 0	.0418	.1705 46	56.2 5	.288	.437	.66	3.15
1.04	0.7 6	.0348	.1705 01	56.2 7	.250	.382	.59	9.23
6.52	.28	.0085	.1703 69	56.3 3	.137	.234	.43	5.33
11.8 0	0.0 0	.0000	.1702 10	56.4 1	.001	.331	.45	8.90
14.5 9	2.7 9	.0024	.1700 03	56.5 1	0.176	.152	.30	8.52
18.0 0	6.2 0	.0117	.1699 93	56.5 1	0.185	.238	.50	6.89



PARAMETERS

Material : STEEL - FERRITIC (Cr_Ka)
(BCC, hkl-211)
Tube: Cr_K-Alpha
Wavelength: 2.291
KV:20.00; mA:4.00
Beta Osc:2.00; Phi Osc:0.00; X Osc:0.00;
Y Osc:0.00;
Exp. time: 1.20 1.20
Nr of exp: 20 20
Aperture : 1
Filters :

Background static fit:

LeftStartPixel : 130 66
RightStartPixel: 333 258
ROI Left: 125 59

Comments:

B# 1, F#: 015CD4AE, S#: 7, B# 1, F#: 015CD4AE, S#: 7,

Units: MPa
Bragg Angle: 156.41
Peak Location : Gaussian 100%
Gain Correction: P/G(s)
PeakShift: Absolute Peak
(1/2)S2:5.92 E-6 [1/MPa] -S1:1.28
E-6 [1/MPa]
DSpacing (Angstroms): 1.1702087
LPA Correction: YES
Psi Zero Assignment (Pixel) : 253.85
181.58
LeftStopPixel : 140 76
RightStopPixel : 343 268
ROI Right : 347 272